

**SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS:  
ESTUDIO DE LAS PRESTACIONES DEL CÓDIGO PASSIM.  
APLICACIÓN AL CONJUNTO BIOCLIMÁTICO DE BEGUES.**

**TESIS DOCTORAL**

**presentada en la E.T.S.E.I.T. (U.P.C.)  
para la obtención del Grado de Doctor**

**por**

**JAUME CENDRA GARRETA**

**TERRASSA, Setiembre 1993.**

A la meva dona,  
per la seva paciència.  
Al meu fill,  
per la seva innocència.

## **AGRADECIMIENTOS.**

En este momento tan especial, por no decir crítico, en la vida de nuestro planeta, quiero expresar, en primer lugar, mi agradecimiento a aquellos pioneros que, desde hace ya muchos años, se preocuparon del desarrollo de las energías alternativas y, en particular, del aprovechamiento de la energía solar en la arquitectura. A aquellos otros que, anonimamente, han contribuido a su divulgación y aplicación en los diversos ámbitos de la actividad humana, ya que sin este impulso creador difícilmente podremos llevar este hogar a buen puerto.

Entre estos, quiero agradecer el esfuerzo realizado por todos aquellos que desde el Institut Català d'Energia han contribuido a sacar adelante el proyecto de promoción y realización del conjunto bioclimático de Begues, sin el cual, esta Tesis, no hubiera sido posible.

Quiero agradecer, también, a todos los compañeros y colaboradores de la Sección de Física de la E.T.S. de Arquitectura del Vallès, y especialmente a Joan Anton Cusidó por su colaboración e interés, por el trabajo que constituye el contenido de esta Tesis, particularmente en la parte que hace referencia a la labor de seguimiento del conjunto bioclimático de Begues.

A mis compañeros del Laboratori de Termoenergètica de la E.U.E.T.I.T., Nabih Khanafer y José Juan de Felipe, que me han sustituido cuando ha sido necesario y no han regateado esfuerzos a la hora de prestarme su apoyo.

A mis compañeros del Laboratori de Motors Tèrmics i Automòbils de la E.T.S.E.I.T. que me han animado constantemente en mi labor, especialmente a Ramon Carreras por su indefectible interés y por su apoyo, en el momento de resolver todos aquellos percances burocráticos que se han cruzado en mi camino durante todos estos años.

Finalmente, quiero agradecer a mi Director de Tesis, Joan Puigdomènech Franquesa, el tiempo que ha perdido conmigo y el especial apoyo y acogimiento prestados en aquellos momentos difíciles.

# ÍNDICE



## ÍNDICE.

---

Nomenclatura.....	5
Resumen.....	8

### Capítulo 1: Introducción.

1.1 Estimación del potencial de conservación de energía en los edificios.....	1.2
1.2 Modelización del comportamiento térmico de edificios.....	1.4
1.3 El conjunto bioclimático de Begues.....	1.4
Referencias bibliográficas.....	1.6

### Capítulo 2: El conjunto bioclimático de Begues.

2.1 Objetivos del conjunto bioclimático de Begues.....	2.2
2.2 Emplazamiento y climatología.....	2.2
2.3 Descripción del conjunto bioclimático de Begues.....	2.4
2.4 Actividades realizadas durante el seguimiento.....	2.9
2.4.1 Recomendaciones a los usuarios sobre la labor de seguimiento.....	2.10
2.4.2 Instrumentación utilizada.....	2.11
2.4.3 Análisis de los datos del seguimiento.....	2.12
2.4.4 Resultados de las encuestas pasadas a los usuarios.....	2.17
2.4.5 Estudio termográfico de las viviendas.....	2.19
2.5 Evaluación del comportamiento térmico de las viviendas.....	2.22
Referencias bibliográficas.....	2.23

### Capítulo 3: PASSIM, un programa general de simulación de sistemas solares pasivos.

3.1 La simulación del comportamiento térmico de edificios.....	3.2
3.2 Resumen del funcionamiento del programa PASSIM.....	3.2
3.2.1 Fichero de configuración.....	3.4
3.2.1.1 Nodos.....	3.4
3.2.1.2 Enlaces.....	3.4
3.2.1.3 Operaciones diversas.....	3.6
3.2.2 Algoritmo de resolución.....	3.7
3.3 Comentario acerca del PASSIM.....	3.8
Referencias bibliográficas.....	3.9

## Capítulo 4: Análisis térmico de edificios mediante el código PASSIM.

4.1	Introducción.....	4.2
4.2	Estudio preliminar sobre la descomposición nodal.....	4.2
4.2.1	Análisis de la influencia de la subdivisión nodal en distintos elementos arquitectónicos considerados aislados.....	4.3
4.2.2	Análisis de la influencia de la subdivisión nodal en distintos elementos arquitectónicos integrados en su conjunto.....	4.9
4.2.2.1	Experimento numérico en una habitación orientada al sur.....	4.9
4.2.2.2	Experimento numérico en una habitación orientada al norte.....	4.14
4.2.2.3	Conclusiones sobre los experimentos numéricos realizados.....	4.17
4.3	Construcción del modelo térmico de la casa nº15 del conjunto de Begues.....	4.18
4.3.1	Descomposición nodal.....	4.18
4.3.2	Definición de enlaces conductivos.....	4.22
4.3.3	Definición de enlaces convectivos.....	4.26
4.3.4	Definición de enlaces radiativos.....	4.27
4.3.5	Definición de enlaces debidos a una fuente de calor exterior.....	4.27
4.3.6	Apertura de ventanas.....	4.28
4.3.7	Definición de las condiciones iniciales.....	4.28
4.4	Resultados de la modelización: Temperaturas.....	4.29
4.4.1	Contrastación experimental.....	4.29
4.5	Estudio de sensibilidad frente a diferentes parámetros.....	4.47
4.6	Resultados de la modelización: Balances energéticos.....	4.48
4.6.1	Balance energético en un periodo invernal.....	4.48
4.6.2	Balance energético en un periodo estival.....	4.50
	Referencias bibliográficas.....	4.55

## Capítulo 5: Evaluación del comportamiento térmico del conjunto bioclimático de Begues.

5.1	Simulación de la casa nº 15 (con muro Trombe).....	5.2
5.1.1	Influencia de distintas estrategias de utilización.....	5.2
5.1.1.1	Apertura de ventanas.....	5.2
5.1.1.2	Empleo de energía auxiliar.....	5.11
5.1.1.3	Régimen de ventilación.....	5.23
5.1.2	Influencia de distintos parámetros de diseño.....	5.27
5.1.2.1	Aislamiento en el techo.....	5.27
5.1.2.2	Patologías diversas.....	5.31
5.2	Simulación de una casa con invernadero adosado.....	5.33
5.2.1	Influencia de distintas estrategias de utilización.....	5.33
5.2.1.1	Apertura de ventanas.....	5.33
5.2.1.2	Empleo de energía auxiliar.....	5.44
5.2.1.3	Ventilación del invernadero en el periodo estival.....	5.45
5.2.2	Influencia de distintos parámetros de diseño.....	5.47
5.2.2.1	Aislamiento en el techo.....	5.47
5.3	Simulación de una casa convencional (con ganancias directas).....	5.48
5.3.1	Influencia de distintas estrategias de utilización.....	5.48
5.3.1.1	Apertura de ventanas.....	5.48
5.3.1.2	Empleo de energía auxiliar.....	5.58
5.3.2	Influencia de distintos parámetros de diseño.....	5.59
5.3.2.1	Aislamiento en el techo.....	5.59
5.4	Contrastación del comportamiento térmico de las tres tipologías solares consideradas.....	5.60

5.5 Comparación del comportamiento térmico de las tres tipologías solares optimizadas y bajo condiciones de utilización eficiente.....	5.62
Referencias bibliográficas.....	5.65

## Capítulo 6: Conclusiones.

6.1 Conclusiones relativas al PASSIM.....	6.2
6.2 Conclusiones relativas al conjunto bioclimático de Begues.....	6.3

## Apéndices:

### Apéndice A: Cálculo de factores de vista.

A.1 Introducción.....	A.1
A.2 El método del contorno de integración de Sparrow.....	A.1
Referencias bibliográficas.....	A.3

### Apéndice B: Listados de ficheros de configuración.

B.1 Fichero de configuración del experimento numérico realizado en una habitación sur incorporando un muro Trombe (EXP-A0).....	B.1
B.2 Fichero de configuración del experimento numérico realizado en una habitación norte (EXP-B0).....	B.2
B.3 Fichero de configuración del modelo de la casa nº 15 de Begues.....	B.3

## **RESUMEN**

## RESUMEN.

---

Dentro del nuevo contexto energético surgido a partir de la primera crisis del petróleo, la Generalitat de Catalunya promovió, a mediados de los 80 como operación de demostración, un proyecto de construcción de 20 viviendas solares de protección oficial en Begues (Baix Llobregat). Dada la importancia de este proyecto, por el hecho de ser la primera experiencia de envergadura realizada en este campo en Catalunya, el Departament d'Indústria i Energia de la Generalitat de Catalunya en colaboración con la E.T.S. de Arquitectura del Vallés, realizó un seguimiento del funcionamiento de estas casas durante sus tres primeros años de ocupación, con la finalidad de obtener información fiable del comportamiento térmico de estas viviendas.

Esta Tesis Doctoral se enmarca dentro de la labor iniciada con la finalidad de aprovechar esa experiencia para la mejora de las condiciones de confort térmico y ahorro energético de esas y otras viviendas solares construidas en el futuro. Punto culminante de esta labor, y con la finalidad de poder realizar un estudio exhaustivo de las transferencias energéticas habidas en ellas, fue la elaboración de un modelo térmico de las viviendas del conjunto de Begues. Para ello se dispuso de un programa de simulación de sistemas solares pasivos, el PASSIM, basado en el método de la descomposición nodal.

El análisis de los resultados del seguimiento realizado en el conjunto bioclimático de Begues y del procedimiento de operación del PASSIM, constituyen el contenido de los Capítulos 2 y 3 de esta Tesis, respectivamente.

En el Capítulo 4 se aborda una cuestión previa, de gran importancia en la labor de modelización de un sistema solar, cuando se realiza desde la perspectiva de la descomposición nodal: el grado de subdivisión necesario para la fiabilidad de los resultados obtenidos por este procedimiento. La construcción del modelo de una de las casas del conjunto bioclimático de Begues y la contrastación de los resultados de esta modelización con los del seguimiento, permiten extraer algunas importantes conclusiones acerca de las capacidades de los códigos de simulación, tipo PASSIM. El análisis del balance energético de esa vivienda, obtenido a partir de ese trabajo de modelización, permite, también, extraer información acerca de su comportamiento energético.

Una vez aceptada la fiabilidad de los resultados obtenidos en la anterior contrastación, se aborda en el Capítulo 5, y mediante el empleo del mismo programa PASSIM, la simulación del comportamiento térmico de la casa modelizada anteriormente, planteándose distintas hipótesis de utilización de la vivienda, así como, diferentes alternativas constructivas. Una parte importante de esta labor, la constituye la comparación del comportamiento térmico de tres alternativas solares distintas, consideradas sobre la misma vivienda: las tipología de muro Trombe, de invernadero adosado y de ganancias directas o casa convencional, la cual fue utilizada como referencia a fin de obtener conclusiones acerca de la bondad de los sistemas solares empleados. El hecho de encontrarse esas tres alternativas construidas en el campo bioclimático de Begues, nos permitirá realizar una nueva contrastación de los resultados de simulación obtenidos para las tres tipologías. Finalmente, se concluye el Capítulo con un estudio de mejora de las prestaciones energéticas de estos tres tipos de viviendas solares,

analizando la influencia que distintos parámetros de diseño tienen sobre su comportamiento térmico y solventando algunas de las deficiencias observadas en cada una de ellas, definiéndose, además en cada caso, una hipótesis de utilización óptima de la vivienda considerada. La comparación de estas tres viviendas ideales utilizadas óptimamente, permite obtener conclusiones finales acerca de la mejor alternativa posible.

## **NOMENCLATURA**

## NOMENCLATURA.

---

### Letras griegas.

$\alpha$ :	Absortividad de una superficie.
$\delta$ :	Densidad.
$\epsilon$ :	Emisividad de una superficie.
$\theta$ :	Ángulo formado por el vector $r_{ij}$ con la normal a la superficie.
$\lambda$ :	Conductividad térmica.
$\rho$ :	Reflectividad de una superficie.
$\sigma$ :	Constante de Steffan-Boltzmann.
$\tau$ :	Transmisividad de una superficie.

### Letras romanas.

A:	Área.
C:	Capacidad calorífica de un nodo. Tipología convencional o de ganancias directas.
CS:	Contribución solar.
c:	Calor específico.
e:	Espesor de un nodo.
FAS:	Fracción de Ahorro Solar (invernal).
FAE:	Fracción de Ahorro Estival.
$G_{ij}$ :	Conductividad térmica equivalente entre los nodos i y j.
h:	Altura de una abertura.
$H_{ij}$ :	Coefficiente de transmisión de calor por convección entre los nodos i y j.
I:	Tipología de invernadero adosado.
l:	Anchura de una abertura.
m:	Masa asociada a un nodo.
$N_f$ :	Suma del número de nodos flotantes y regulados. Número de ecuaciones.
NRH:	Número de renovaciones por hora.
P:	Tipología de patio central cubierto.
Q:	Energía calorífica.



$Q_{ij}$ :	Intercambio calorífico entre los nodos $i$ y $j$ .
$r_{ij}$ :	Distancia entre los nodos $i$ y $j$ .
$R_{ij}$ :	Coefficiente de transmisión de calor por radiación entre los nodos $i$ y $j$ .
$S_j$ :	Potencia calorífica aportada desde el exterior al nodo $j$ .
$t$ :	Tiempo.
$T$ :	Temperatura de un nodo. Tipología Trombe.
$U_{ij}$ :	Coefficiente global de transmisión de calor entre los nodos $i$ y $j$ .
$V$ :	Volumen.

### Subíndices:

aux:	Energía auxiliar.
gan:	Ganado.
$i$ :	Un nodo cualquiera.
int:	Ganancias internas.
$j$ :	Un nodo cualquiera.
perd:	Perdido.

### Supraíndices:

$\Delta t$ :	Intervalo de tiempo. Paso de simulación.
$t$ :	Tiempo.

**CAPÍTULO 1**

**INTRODUCCIÓN**

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Estimación del potencial de conservación de energía en los edificios.

En 1975 el consumo de energía en el sector residencial entre los miembros de la Organización para el Desarrollo y la Cooperación Económica (O.C.D.E.) representaba el 26% de su consumo total de energía [1], pero a éste debería sumársele, también, el consumo de energía en los edificios de los otros sectores consumidores de energía: la industria, el sector comercial y de servicios, y el agrícola. Para la Comunidad Europea esa estimación era en el año 1987 del 43%, que quedaba algo reducida para el consumo en España, a causa de su particular climatología dentro del contexto europeo. Evidentemente, esos valores sólo pueden ser tomados de una forma aproximada, sin embargo, indican que el consumo de energía en los edificios es una porción importante del consumo energético en los países desarrollados.

En general, para la mayoría de países la mayor parte de la energía usada en los edificios comerciales y residenciales lo es para calefacción, siguiéndole en orden de importancia la parte destinada a la producción de agua caliente sanitaria. Sólo EE.UU. presenta una porción notable de ese consumo para el acondicionamiento de aire de los edificios. Sin embargo, el cambio de hábitos en el confort térmico está convirtiendo a muchos países potenciales consumidores de energía en este sector, entre los cuales se encuentra el nuestro, lo cual compensará rápidamente nuestras menores necesidades en calefacción.

Según G. Bergmann [2] la lista de prioridades en el esfuerzo que hay que hacer para reducir el consumo de energía en los edificios es la siguiente:

- 1) aislamiento eficiente,
- 2) reducción de pérdidas en los equipos destinados a la climatización,
- 3) aumentar la eficacia de quemadores, lámparas, máquinas, aparatos eléctricos, etc.
- 4) mejorar la regulación y el control en los equipos destinados a la climatización y a la iluminación,
- 5) uso de técnicas de recuperación del calor,
- 6) uso de energías alternativas y
- 7) uso de medidas pasivas.

Las estimaciones cuantitativas sobre el efecto que la aplicación de las anteriores medidas tendría en la conservación de energía en los edificios son extremadamente inciertas, sin embargo, un detallado estudio realizado en la antigua R.F.A. [3] concluye que el ahorro podría llegar a ser del orden del 50% del total del sector. En la Tabla 1.1 se muestra, con más detalle, la reducción que podría conseguirse a partir de distintas modificaciones realizadas en la piel del edificio.

Las mismas conclusiones han sido obtenidas en EE.UU. por el National Bureau of Standards [4] y la Ford Foundation [1], la cual considera que ese porcentaje puede ser alcanzado mediante la mejora del aislamiento térmico y la introducción de cambios en los sistemas de climatización e iluminación (puntos 1 a 4 de la lista anterior). Sin embargo, el

límite tecnológico, que estima alcanzable, por lo que hace referencia a las necesidades de calefacción, al considerar cambios en los sistemas energéticos (recuperación de calor y uso de energías alternativas; puntos 5 a 7 de la misma lista), sube hasta el 85-90%.

**Tabla 1.1:** Estimación del ahorro energético en los edificios [3].  
(Los porcentajes no son adicionales)

Medidas constructivas adoptadas	Ahorro energético (%)
Aislamiento adicional en paredes exteriores	50+60 (reducción de pérdidas por transmisión)
Aislamiento adicional en el techo	50+60 (reducción de pérdidas por transmisión)
Instalación de ventanas de doble vidrio	30+40 (reducción de pérdidas por transmisión)
Sellar puertas y ventanas	50+70 (reducción de pérdidas por ventilación)
Aumento de la temperatura superficial de las paredes a causa de un mejor aislamiento	6+12 (reducción de la temperatura de confort térmico en 1 o 2 °C)
Suministro de agua caliente sanitaria descentralizada	Hasta un 35%

A causa del largo tiempo de vida de una vivienda lo más importante es que las medidas de ahorro energético a largo plazo sean adoptadas de la forma más inmediata posible. Además, resulta menos rentable aplicar estas medidas a edificios antiguos que hacerlo en los de nueva construcción. Y, contrariamente a lo que se cree, se ha comprobado que los edificios de nueva construcción pueden ser diseñados de acuerdo a medidas de conservación de la energía, a igual o incluso menor coste, que los tradicionales [5-7].

El reconocimiento de la urgencia con la que las medidas de conservación de la energía tienen que ser introducidas, se hace evidente a partir de los datos de la Tabla 1.2, donde puede se realiza una estimación del periodo de tiempo transcurrido entre el momento de actualizar la legislación y la percepción de su repercusión económica.

**Tabla 1.2:** Estimación del periodo de tiempo transcurrido entre la adopción de una medida de conservación energética y la percepción de su efecto económico [8].

Medidas adoptadas	Periodo de tiempo (años)
Incentivo económico	< 2
Mejora técnica	1+5
Introducción de nuevas tecnologías	5+10
Desarrollo de nuevas tecnologías	10+25
Investigación básica en nuevas tecnologías	< 25

Se ha visto [9] que el efecto debido a las medidas de caracter tecnológico o legislativo se incrementa gradualmente con el tiempo, hasta alcanzar un límite de saturación en el momento en que las posibilidades tecnológicas son equilibradas por consideraciones de caracter económico. Y por consiguiente, este límite será menor que el puramente tecnológico. Parece razonable concluir, que a ese 85-90% de límite tecnológico estimado en el potencial de

conservación de la energía en los edificios, le pueda corresponder un límite económico de alrededor del 50%.

Sin embargo, si la validez de todas estas cifras es de por sí cuestionable, mayor será la incertidumbre, si pensamos que han sido obtenidas para unas condiciones climatológicas y un contexto cultural distintos del de nuestro país. Ello hace necesario e imprescindible la realización de estudios tendentes a extender esos resultados a nuestra área cultural, y en este sentido, seguramente, debe ser la administración pública la encargada de jugar un importante papel en su desarrollo, mediante la promoción de proyectos de demostración.

## **1.2 Modelización del comportamiento térmico de edificios.**

En aras de una mejor comprensión de la contribución que los distintos componentes de un edificio tienen en el balance final y dada la gran cantidad de variables involucradas en el proceso de transferencia de calor entre éste y su medio ambiente, en las experiencias de este tipo se hace imprescindible disponer de un instrumento de trabajo para poder realizar una labor de modelización, que permita estudiar con detalle la influencia de esas y otras variables, bajo condiciones más controladas que las que se dan en las experiencias de campo. Actualmente, son muchos los programas de cálculo existentes para la elaboración de un modelo físico-matemático de un edificio [10], desde métodos muy simples, basados en modelos cuasiestacionarios, aptos para un uso manual, hasta métodos que mediante la utilización de potentes ordenadores, operan integrando numéricamente las ecuaciones de la difusión del calor.

Sin embargo, y a pesar del conocimiento que estos métodos puedan aportarnos, si queremos asegurar un mínimo de consistencia a nuestro trabajo, se hará imprescindible realizar una labor de validación experimental del modelo realizado. Para ello deberemos de disponer de datos de seguimiento del edificio o sistema que estemos modelizando, a fin de que la comparación con los resultados de la simulación nos permita corregir las desviaciones observadas en nuestro modelo. Una vez contrastada su validez, estaremos en condiciones de analizar la influencia que distintas variables puedan tener en el comportamiento térmico de nuestro edificio.

## **1.3 El conjunto bioclimático de Begues.**

Es en este contexto, que hay que situar la iniciativa llevada a cabo a partir de la colaboración conjunta entre la Direcció General d'Arquitectura i Habitatge y el Departament d'Indústria i Energia de la Generalitat de Catalunya, como operación de demostración, de la realización de un proyecto de construcción de 20 viviendas solares de protección oficial en Begues (Baix Llobregat). Dada la importancia de este proyecto, por el hecho de ser la primera experiencia de envergadura en este campo realizada en Catalunya, el Departament d'Indústria i Energia de la Generalitat de Catalunya en colaboración con la E.T.S. de Arquitectura del Vallés, realizó un seguimiento del funcionamiento del conjunto de viviendas durante sus tres primeros años de ocupación, con la finalidad de obtener información fiable del comportamiento térmico de estas viviendas, y al mismo tiempo poder extraer conclusiones aplicables a futuros edificios solares.

Para la realización del trabajo de modelización se eligió, por diversas circunstancias, un programa de simulación de sistemas solares pasivos elaborado por el Groupe de Recherche en Énergie Solaire de la Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, denominado PASSIM. Éste se basa en el método de la descomposición del sistema estudiado en un conjunto de nodos o elementos, en los que se puede suponer, de forma aproximada, la existencia de unas condiciones térmicas uniformes. Este método presenta la ventaja de una gran versatilidad y adaptación a los diferentes sistemas modelizados.

En el próximo Capítulo nos encargaremos de la descripción física del conjunto bioclimático de Begues, la labor de seguimiento realizada en él y del análisis de los resultados obtenidos. Mientras que en el siguiente entraremos a analizar las bases de cálculo del programa PASSIM, así como, su modo de operación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. **OECD.** "Energy Balances of OECD-Countries 1973-1975". París 1977/1960-74. París, Francia , 1976.
2. **Bergmann, G., Bruno, R. y Hörster, H.** "Energy Conservation in Buildings" en Solar Energy Handbook, J.F.Kreider y F. Kreith. McGraw-Hill, New York. 1979.
3. **Dittert, B.** "Möglichkeiten der Energieeinsparung im Gebäudebestand". Batelle Institut, Frankfurt/Main, Alemania. 1977.
4. **Kusuda, T.** "NBSLD, The Computer Program for Heating and Cooling Loads in Buildings". NBS Building Science Series 69, EE.UU. 1976.
5. **Little, A, D.** "An Impact Assesment of ASHRAE Standard 90-75, Energy Conservation in New Building Design". Little Inc, EE.UU. 1975.
6. "Performance of Solar Heating and Cooling Systems". Proceedings of Joint, Conference CCMS and German Section of ISES, Düsseldorf, Alemania. 1978.
7. **Wilbur, D.E, Jr.** "The Potencial for Energy Conservation in Buildings". ADL Impact Services, EE.UU. 1977.
8. **National Economic Development Office.** "Energy Conservation in the United Kingdom". Londres. 1974.
9. **Höglund, J. et al.** "Energiebehov för bebyggelse, hushållningsmöjligheter". Report of an expert group for the Swedish Energy Commission, Estocolmo. 1977.
10. **Achard, P. y Gicquel, R.** "European Passive Solar Handbook". Commission for European Communities, EUR 10 683, Bruselas. 1986.

**CAPÍTULO 2**

**EL CONJUNTO BIOCLIMÁTICO DE BEGUES**



## **CAPÍTULO 2: EL CONJUNTO BIOCLIMÁTICO DE BEGUES**

---

### **2.1 Objetivos del conjunto bioclimático de Begues.**

Desde la primera crisis del petróleo en la segunda mitad de los años 70 y, a pesar, del gran empuje experimentado en nuestro país en el campo de la investigación y desarrollo de las distintas formas de aprovechamiento de la energía solar, hasta hace bien poco eran prácticamente nulos los resultados experimentales obtenidos en experiencias de campo realizadas en el ámbito de la arquitectura solar o bioclimática. Conscientes de esta laguna, e igual que se había hecho en otros países europeos, como Francia, Holanda o Italia, o en los mismos Estados Unidos, desde la administración catalana se promovió un proyecto que permitiera llenar, en parte, este vacío existente en nuestro país. De esta forma surge, a partir de la colaboración conjunta de la Direcció General d'Arquitectura i Habitatge y del Departament d'Indústria i Energia de la Generalitat de Catalunya, como operación de demostración, la realización de un proyecto de construcción de 20 viviendas solares de protección oficial en la población de Begues (Baix Llobregat).

Dada la importancia de este proyecto, por el hecho de ser la primera experiencia de envergadura en este campo realizada en Catalunya, el Departament d'Indústria i Energia de la Generalitat de Catalunya en colaboración con la E.T.S. de Arquitectura del Vallés, realizó un seguimiento del funcionamiento de estas casas durante sus tres primeros años de ocupación, con la finalidad de obtener información fiable del comportamiento térmico de estas viviendas, así como, aprovechar esa experiencia para la mejora de las condiciones de confort térmico y ahorro energético de futuras viviendas solares.

### **2.2 Emplazamiento y climatología.**

Las viviendas del conjunto bioclimático se encuentran ubicadas en la localidad de Begues, situada, en dirección sudoeste, a 30 km de Barcelona y a poca distancia del litoral catalán, aunque separada de éste por el macizo del Garraf (Fig. 2.1).

A nivel orográfico, el lugar constituye un pequeño valle situado a unos 400 m de altitud, que ofrece una relativa protección contra los vientos. Esta configuración proporciona al enclave un microclima, especialmente valorado por los veraneantes de la cercana Barcelona, que permite que las temperaturas permanezcan del orden de unos 2.5 °C por debajo de los valores promedios correspondientes al vecino delta del Llobregat, al que le corresponde una temperatura media anual de 15 °C. Como resultado de ello, mientras las temperaturas estivales son más bien agradables, los inviernos acostumbra a ser fríos, con presencia casi diaria de heladas nocturnas, por lo que las necesidades energéticas en esta época del año son más bien importantes.

Es de destacar, también, que la influencia del mar, a pesar de su proximidad, es mínima, debido al efecto de protección natural que ofrece el macizo del Garraf.

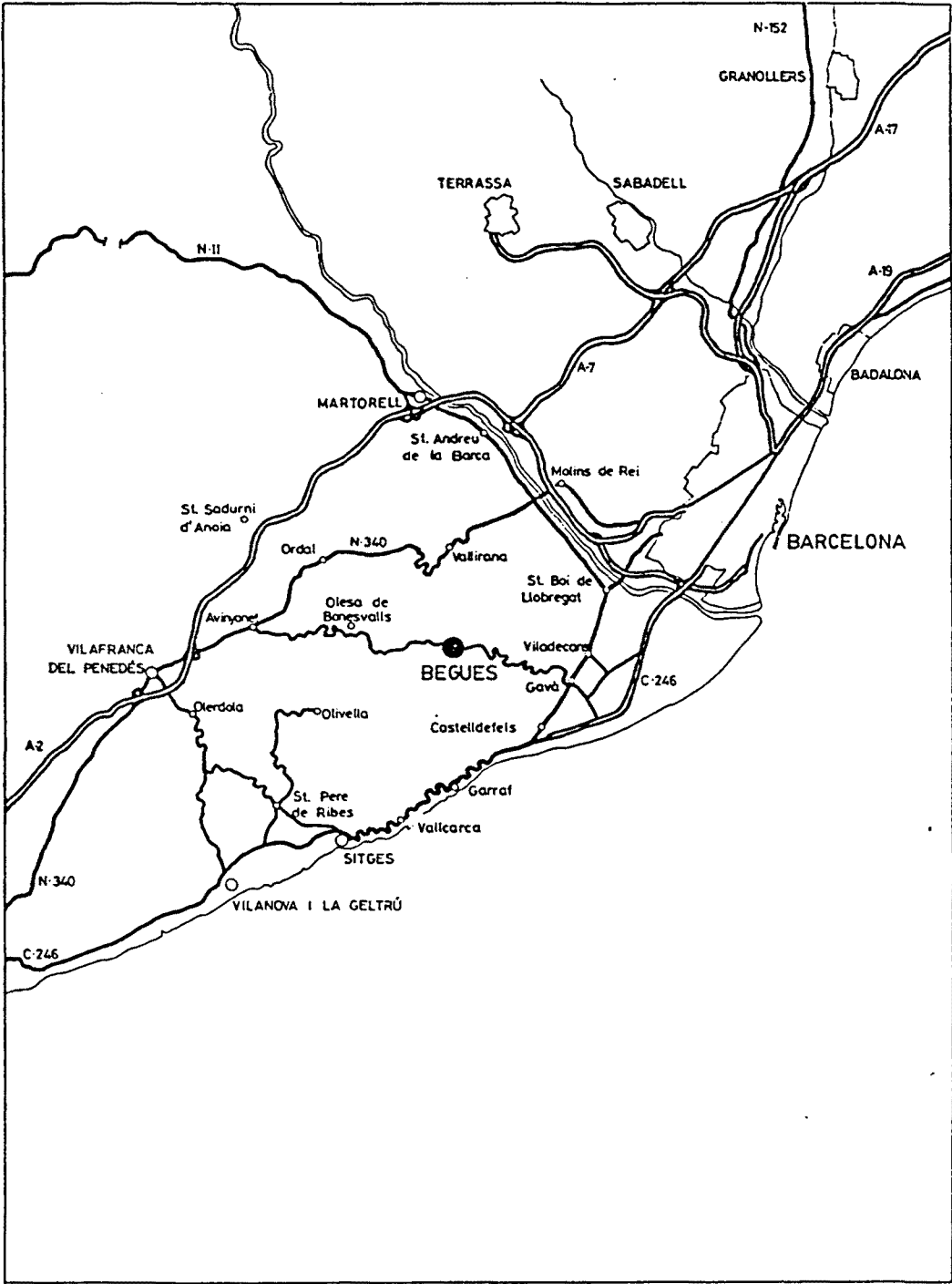


Fig. 2.1: Plano de emplazamiento de Begues.

### 2.3 Descripción del conjunto bioclimático de Begues.

Como ya se ha dicho, el conjunto bioclimático de Begues consta, tal como puede verse en el plano de la Fig. 2.2, de 20 viviendas unifamiliares agrupadas en cinco bloques distintos. Cada vivienda tiene planta baja y piso, con la misma superficie útil aunque distribuida de forma distinta en función de si el acceso es por su fachada norte (bloques 2 y 3) o por su fachada sur (bloques 4 y 5), exceptuando las casas del bloque 1, que a causa de su particular sistema de captación son algo distintas de las anteriores. De todas formas, esta aparente igualdad interior se ve rota desde una perspectiva exterior, a causa de los diferentes sistemas de captación solar que se les incorporaron, que son los siguientes:

- Tipología convencional o de ganancias directas (que denominaremos tipo C): representada por las viviendas números 7 y 17. Son viviendas cuyo único sistema de captación solar son las ventanas situadas en su fachada sur. Se diferencian entre ellas, únicamente, por el tipo de acceso.
- Tipología combinada, muro Trombe + ganancias directas (denominada tipo T): está representada por las viviendas 3 a 6, con acceso norte, y las viviendas 13 a 16, con acceso sur (Fig.2.3). La captación solar se realiza a través de la ventana de la sala de estar de la planta baja (ganancias directas) y de un muro Trombe, que ocupa el resto de la fachada sur (ganancias indirectas).
- Tipología de invernadero adosado (denominada tipo I): está representada por las viviendas 8 a 12, de acceso norte y las viviendas 18 a 20, de acceso sur (Fig.2.4). Su sistema de captación está formado por un invernadero adosado en la totalidad de su fachada sur, y al cual dan las ventanas existentes en ella.
- Tipología de patio cubierto (denominada tipo P): son representantes de este tipo las casas 1 y 2 (Fig.2.5). La captación solar se realiza a través de un patio central cubierto o invernadero interior, además de las ventanas orientadas a sur.

Es de destacar que en la anterior clasificación, exceptuando las dos casas de patio central que son ligeramente distintas, para cada uno de los dos tipos de distribución interior existentes en función de la orientación de su acceso (norte o sur), se encuentran representadas cada una de las anteriores tipologías solares. Esta elección tiene su justificación en la posibilidad de poder comparar así, a nivel experimental y a escala real, el comportamiento térmico de cada uno de los sistemas de captación solar elegidos, eliminando una variable difícil de evaluar, como puede serlo la influencia de la distribución interior del edificio.

En las Tabla 2.1 y 2.2, aparecen para cada una de las viviendas, sus dimensiones geométricas más importantes y las de sus espacios solares, respectivamente.

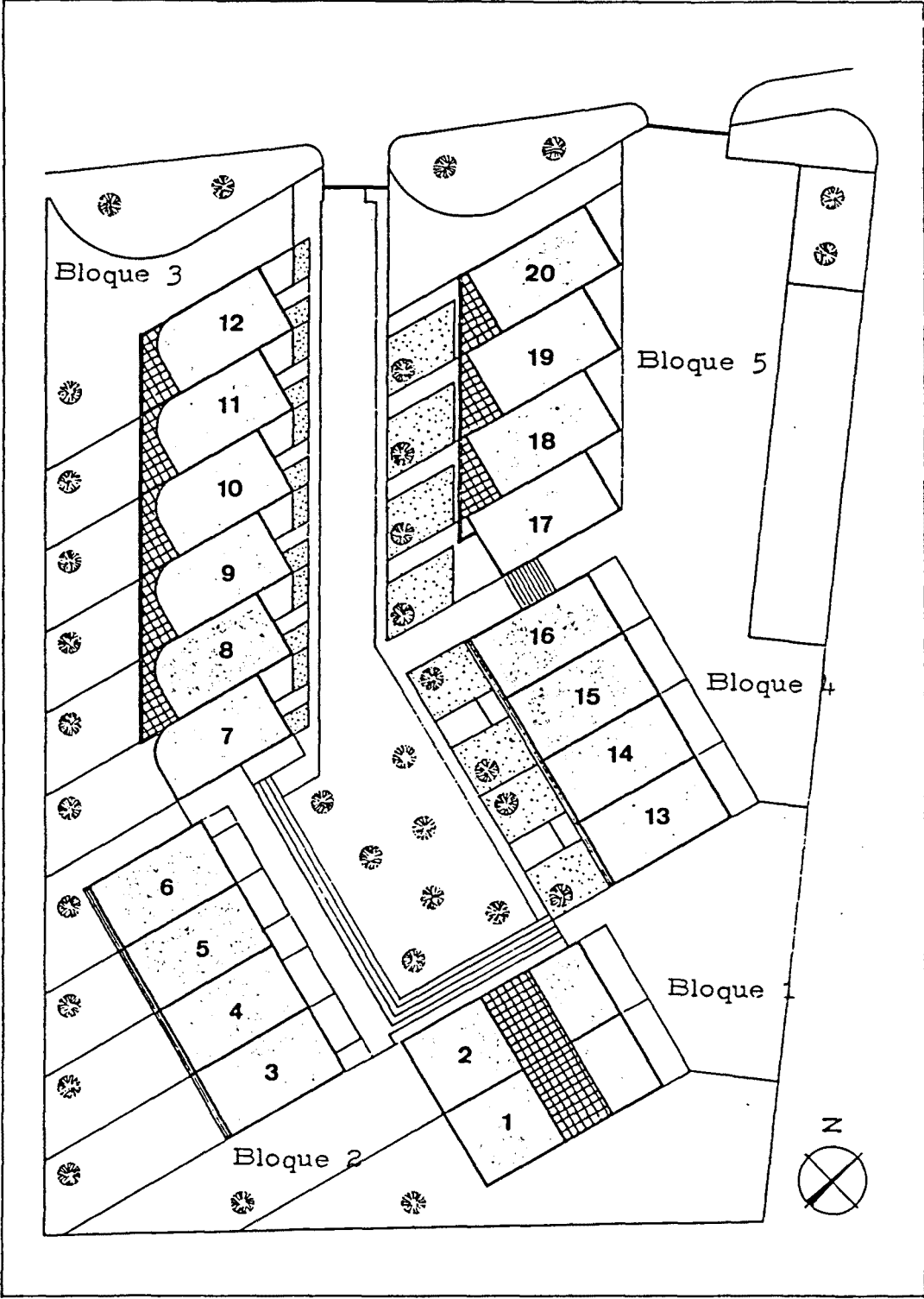


Fig.2.2: Plano de conjunto del campo bioclimático de Begues.

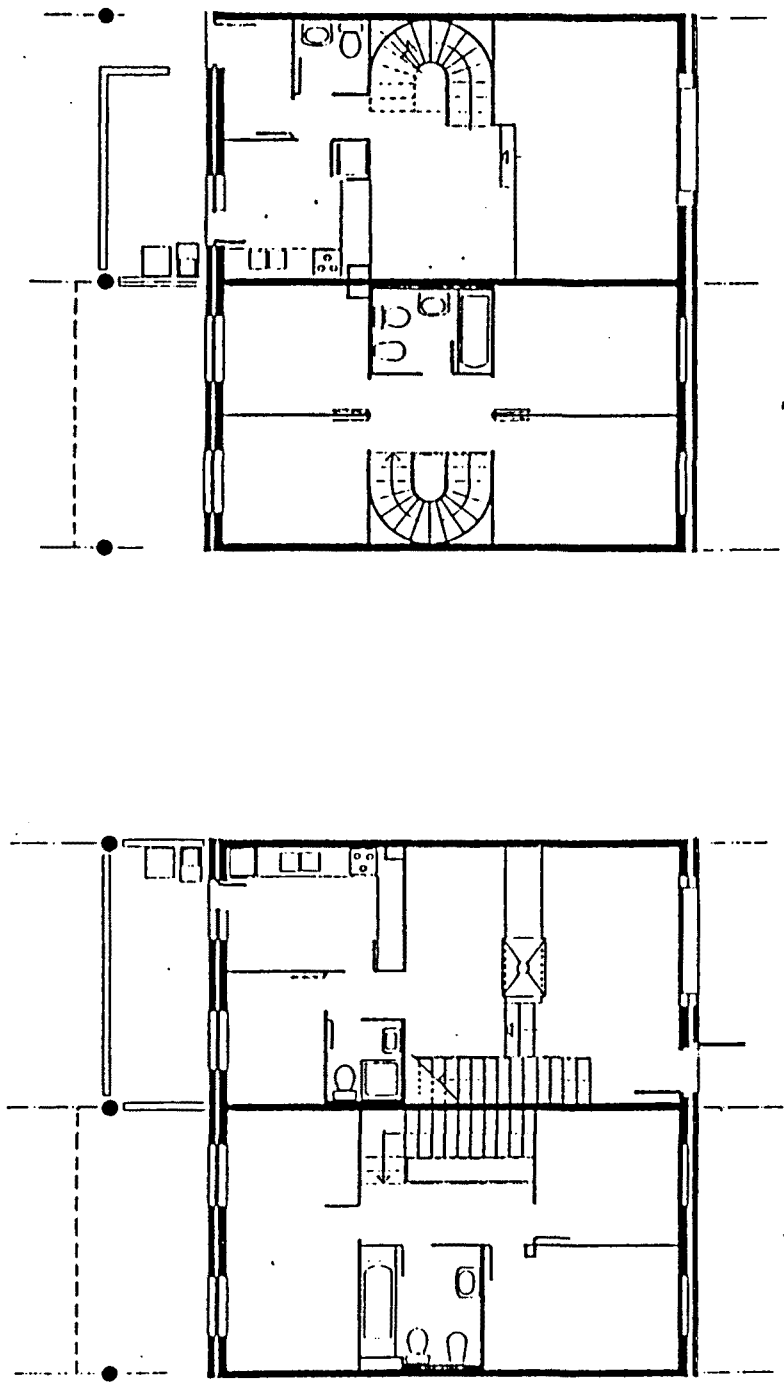


Fig.2.3: Plano de las casas de tipología Trombe. Arriba, acceso norte; abajo, acceso sur.

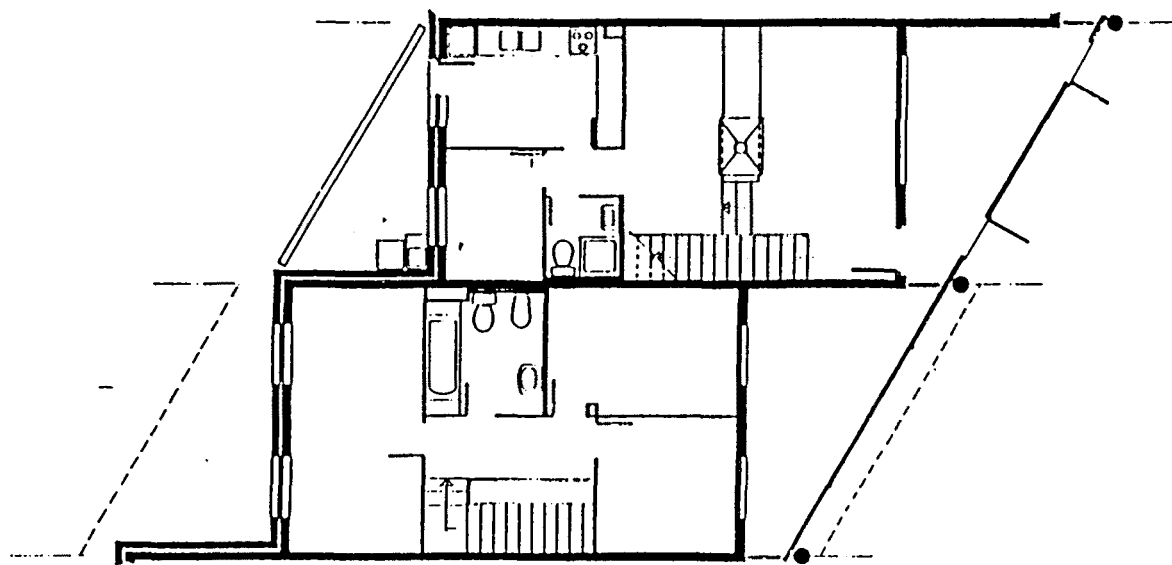
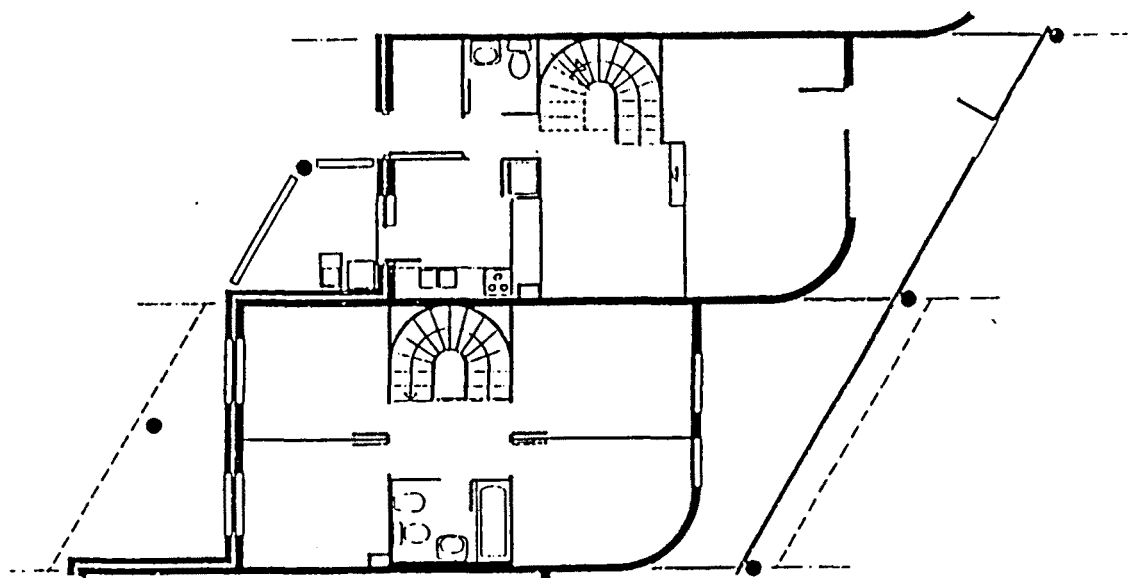


Fig.2.4: Plano de las casas de tipología invernadero. Arriba, acceso norte; abajo, acceso sur.

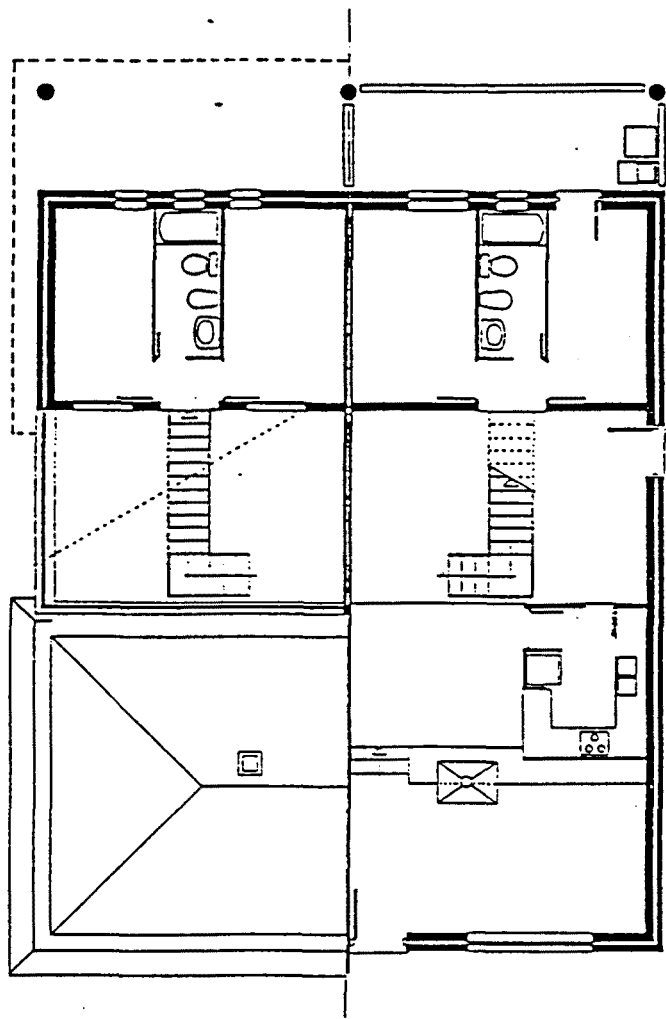


Fig.2.5: Plano de las casas de tipología de patio central cubierto.

Tabla 2.1: Principales dimensiones de las viviendas del conjunto bioclimático de Begues.

Vivienda nº	Tipología		Sup. útil m <sup>2</sup>	Vol. útil m <sup>3</sup>	Sup. cubierta m <sup>2</sup>	Muro exterior m <sup>2</sup>	Sup. ventanas, m <sup>2</sup>	
	Solar	Acceso					Total	Sur
1 patio int.	P	Norte	90	239	76	100	12.7	7.2
			114	351	100	113	15.8	10.3
2 patio int.	P	Norte	90	239	76	100	12.7	7.2
			114	351	100	113	15.8	10.3
3	T	Norte	90	246	56	92	16.8	11.3
4	T	Norte	90	246	56	32	16.8	11.3
5	T	Norte	90	246	56	32	16.8	11.3
6	T	Norte	90	246	56	92	16.8	11.3
7	C	Norte	90	246	69	130	16.7	10.9
8	I	Norte	90	246	69	50	16.7	10.9
9	I	Norte	90	246	69	50	16.7	10.9
10	I	Norte	90	246	69	50	16.7	10.9
11	I	Norte	90	246	69	50	16.7	10.9
12	I	Norte	90	246	69	102	16.7	10.9
13	T	Sur	90	246	56	92	17.6	10.2
14	T	Sur	90	246	56	32	17.6	10.2
15	T	Sur	90	246	56	32	17.6	10.2
16	T	Sur	90	246	56	92	17.6	10.2
17	C	Sur	90	246	69	127	17.6	10.2
18	I	Sur	90	246	69	50	17.6	10.2
19	I	Sur	90	246	69	50	17.6	10.2
20	I	Sur	90	246	69	109	17.6	10.2

2.4 Actividades realizadas durante el seguimiento.

En el marco del convenio de colaboración firmado entre el Departament d'Indústria i Energia de la Generalitat de Catalunya y el Institut d'Estudis Catalans, el equipo de seguimiento de la E.T.S. de Arquitectura del Vallés realizó, en el periodo de tres años comprendido entre 1989 y 1991, un conjunto de actividades relacionadas en [1], y de entre las cuales destacamos las siguientes:

- Gestión de la relación con los usuarios y orientación sobre la labor de seguimiento.
- Mantenimiento del equipo de instrumentación y análisis de los datos obtenidos.
- Preparación, realización y análisis de encuestas a los usuarios.
- Estudio termográfico de las viviendas.
- Evaluación del comportamiento térmico de las viviendas y análisis comparativo de las diversas tipologías, con propuestas de mejora.

La casa nº 15, correspondiente a la tipología de muro Trombe, fue seleccionada para su cesión, durante el periodo de monitarización del conjunto, como sede desde donde llevar a cabo dicho trabajo. A continuación analizaremos más detalladamente algunos aspectos relacionados con los puntos anteriores.



2.4.1 Recomendaciones a los usuarios sobre la labor de seguimiento.

Para tratar de eliminar al máximo las incertidumbres aparejadas a todo trabajo de campo, era necesario conseguir la estrecha colaboración de los usuarios desde el primer momento. Es por ello, que se estableció con éstos una relación contractual durante los tres primeros años de ocupación de las viviendas, que les instaba a colaborar en la labor de seguimiento, dando facilidades a los encargados del mismo en todas aquellas cuestiones inherentes a la monitorización.

Concretamente se pidió a los usuarios que respetaran las cuestiones siguientes:

- Tratar con el máximo cuidado las sondas de temperatura existentes en su vivienda.
- No disponer ningún elemento calefactor, refrigerador, lámpara o aparato eléctrico, en general, a menos de 2 ó 3 metros de la sonda, de forma que pudiera alterar su lectura.
- No colgar objetos que las ocultasen, ni colocar muebles o armarios contra la pared donde estén colocadas.

El equipo de seguimiento tuvo especial cuidado del cumplimiento de estas normas por parte de los usuarios de las viviendas, pudiendo afirmarse que, en general, han sido perfectamente seguidas por todos ellos.

Tabla 2.2: Características principales de los espacios solares de cada una de las viviendas.

Vivienda nº	Tipología Solar	Planta m <sup>2</sup>	Volumen m <sup>3</sup>	Sup. vidrio m <sup>2</sup>	Sup. vertical proyec. sur m <sup>2</sup>
1	P	24	112	38.8	15.6
2	P	24	112	38.8	15.6
3	T	1.1	5.2	26	24.5
4	T	1.1	5.2	26	24.5
5	T	1.1	5.2	26	24.5
6	T	1.1	5.2	26	24.5
7	C	-	-	26	24.5
8	I	13.4	83.1	50.8	27.6
9	I	13.4	83.1	39.7	27.6
10	I	13.4	83.1	39.7	27.6
11	I	13.4	83.1	39.7	27.6
12	I	13.4	83.1	50.8	27.6
13	T	1.1	5.2	27.5	26
14	T	1.1	5.2	27.5	26
15	T	1.1	5.2	27.5	26
16	T	1.1	5.2	27.5	26
17	C	-	-	27.5	26
18	I	12.9	80.3	44.6	27.6
19	I	12.9	80.3	39.7	27.6
20	I	12.9	80.3	44.6	27.6

2.4.2 Instrumentación utilizada.

El seguimiento realizado fue común a todas las casas, incluyendo como mínimo la instalación de cuatro sondas para la medida de la temperatura ambiental interior en cuatro sitios distintos de las viviendas, que en una vista seccionada de una de ellas, corresponderían a sus cuatro extremos: planta baja norte y sur, planta superior norte y sur.

En la casa nº 15, correspondiente al edificio desde donde se realizó la labor de seguimiento, se colocaron adicionalmente otras cuatro sondas de temperatura interior, dos en la cámara de aire del muro Trombe y otras dos en el falso techo (Fig. 2.6). En el jardín de esta vivienda se instaló, además, una estación meteorológica completa (a excepción de un anenómetro), con inclusión de solarímetros para la medición de la radiación solar total y difusa.

La señal procedente de este conjunto de sondas fue recogida cada 3 minutos, siendo promediada y registrada en disco flexible cada 15 minutos. El equipo de adquisición de datos encargado de esta labor fue el HP-2852A, que si bien funcionó correctamente durante el año que duró la monitorización, sufrió diversas interrupciones debidas a problemas ligados a la fuente de alimentación y a interrupciones en el suministro eléctrico por parte de la compañía. Así mismo, hay que destacar, también, la existencia de numerosas sondas que no llegaron a entrar en funcionamiento por problemas de cableado y de conexión, que no pudieron ser corregidos a lo largo del periodo de seguimiento.

Finalmente, comentar que el consumo de energía auxiliar, electricidad y leña, se obtuvo, respectivamente, a partir de la lectura del contador eléctrico y de las encuestas periódicas realizadas a los usuarios.

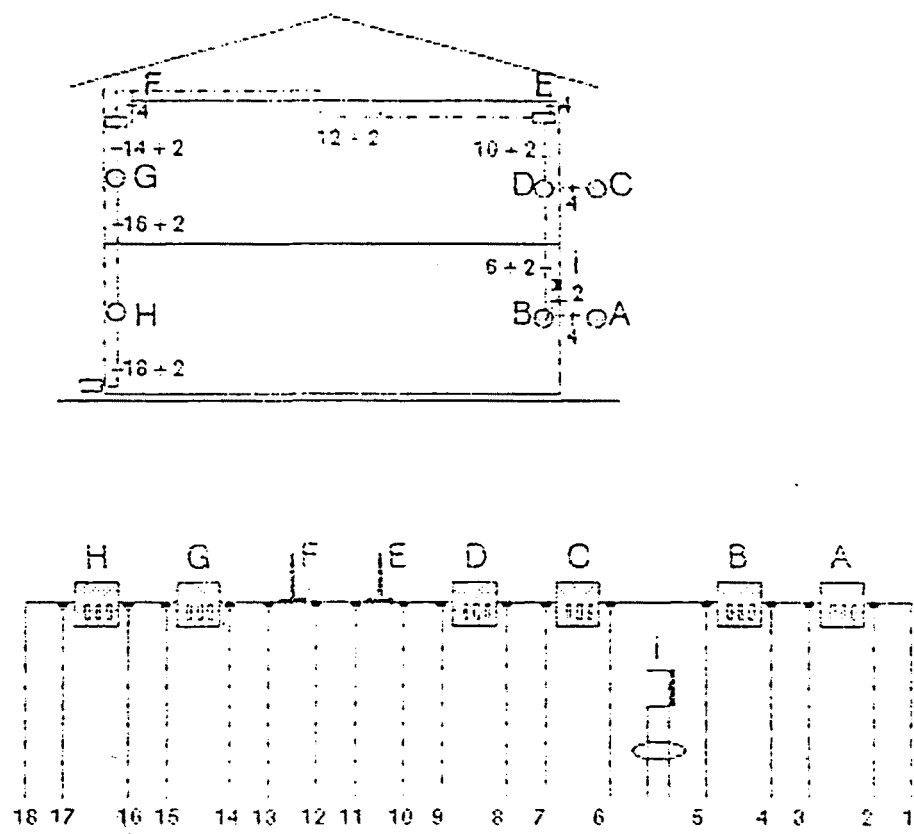


Fig. 2.6: Esquema de las sondas instaladas en la casa nº 15.

2.4.3 Análisis de los datos del seguimiento.

En las Fig.2.7 y 2.8 se presentan los valores de la radiación solar global sobre plano horizontal y las temperaturas exteriores (TN 99) e interiores (RM 1, 2, 5 y 6) registradas para dos periodos seleccionados, correspondientes cada uno de ellos a las estaciones invernal y estival, respectivamente. Para evitar interferencias, los datos de temperaturas interiores mostrados son los correspondientes a la casa desde la que se realizó la labor de seguimiento, que por encontrarse deshabitada, apenas presentó ganancias internas, hallándose, por la misma razón, también cerradas las persianas y postigos de sus ventanas, lo cual hay que tenerlo en cuenta al valorar estos resultados presentados.

A pesar de ello, y según se muestra en la Tabla 2.3, donde se presentan los valores medios, máximos y mínimos de la temperatura del aire en distintas dependencias de esa vivienda, durante un periodo invernal (comprendido entre los días 340 y 350), puede verse como en las habitaciones orientadas a sur se alcanzan valores cercanos a la temperatura de confort, situación que no se da para las habitaciones con orientación norte que presentan valores algo inferiores. Hay que tener en cuenta, en este sentido, que la temperatura registrada por la sonda nº 2, muy inferior a las restantes, corresponde a la cocina, en donde, con poco criterio se instaló una puerta de vidrio sencillo y una ventana de lamas móviles, que acentúan el efecto negativo de la orientación norte.

Contrariamente a lo sucedido para el anterior periodo invernal, para el periodo estival puede apreciarse como todas las temperaturas interiores se mueven dentro de la misma franja, sin presentarse apenas gradientes térmicos entre las habitaciones.

Tabla 2.3: Temperaturas del aire registradas en la casa nº 15, durante un periodo invernal (°C).

Sonda	Situación	Días 340-350			Días 190-200		
		Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.
TN 99	Exterior	-1.90	5.49	13.3	11.6	22.5	33.8
RM 1	Hab. sur inf.	15.1	16.7	18.4	23.4	25.4	27.7
RM 2	Hab. norte inf.	8.55	9.44	10.2	23.7	24.5	25.9
RM 5	Hab.norte sup.	11.0	12.4	13.9	23.5	24.5	26.4
RM 6	Hab. sur sup.	11.6	14.4	17.2	23.4	25.5	27.6
RM 11	Trombe inf.	3.50	10.4	31.5	17.7	27.3	42.3
RM 16	Trombe sup.	5.48	13.9	39.3	16.5	24.6	32.4

En las Figs. 2.9 a 2.12 se presentan los resultados de varias correlaciones realizadas entre distintas combinaciones de las temperaturas interiores. En la Fig.2.9 se muestra la relación existente entre las temperaturas de las habitaciones sur inferior T<sub>1</sub> y superior T<sub>6</sub>; puede verse como T<sub>1</sub> es siempre superior a T<sub>6</sub>, sobretodo para valores de temperaturas bajos, desapareciendo esta diferencia a medida que aquellas aumentan, pudiéndose ello atribuir a las pérdidas a través de la cubierta. Mientras que en la Fig.2.10 se muestra la relación existente entre las temperaturas de las habitaciones norte inferior (T<sub>2</sub>: cocina) y superior (T<sub>5</sub>); puede verse como la temperatura de la cocina T<sub>2</sub> se mantiene entre 2 y 3°C por debajo de la T<sub>5</sub>, debido a la existencia, ya comentada, de la puerta y ventana de vidrio sencillo. En la Fig.2.11 se muestra, así mismo la relación existente entre las temperaturas de las habitaciones superiores

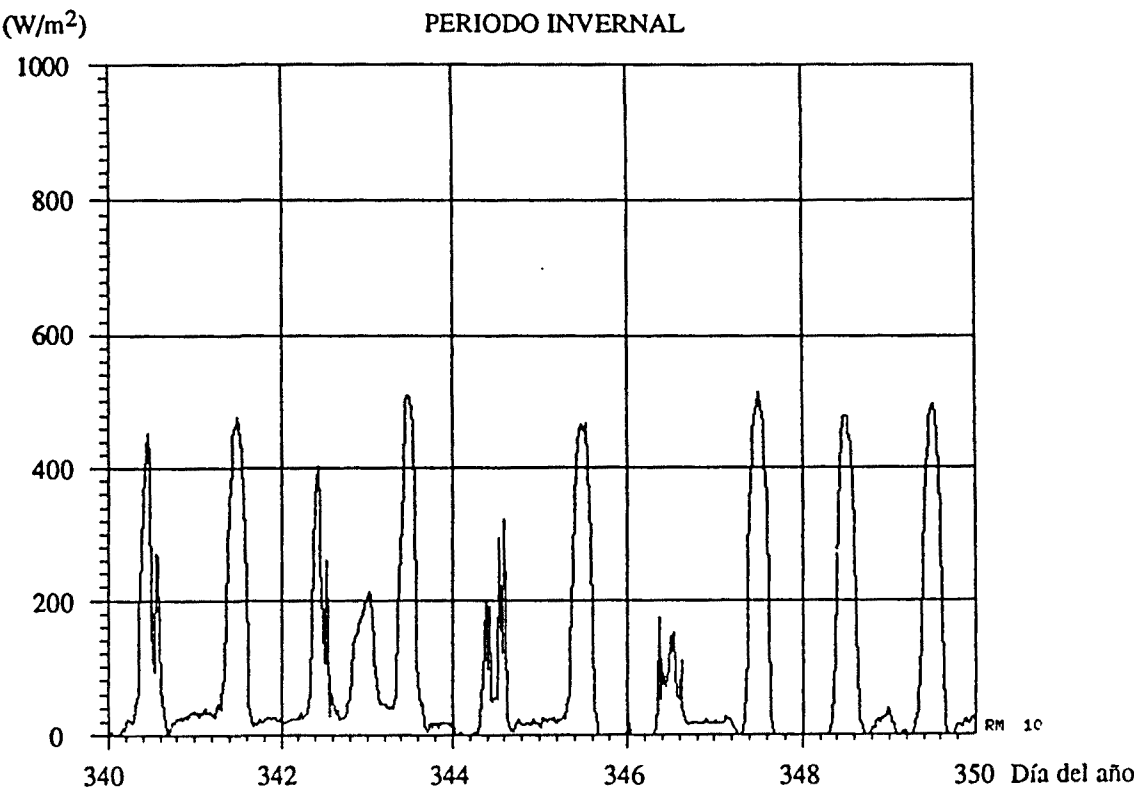


Fig.2.7a: Radiación solar global sobre plano horizontal registrada.

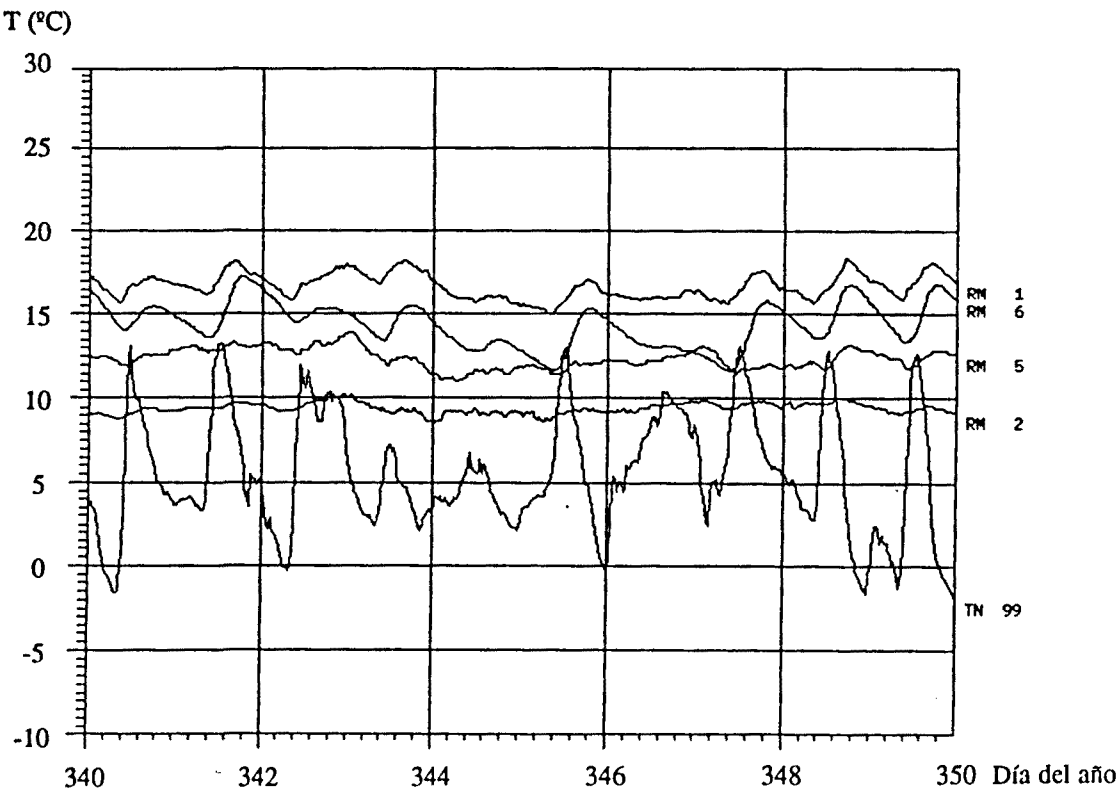


Fig.2.7b: Temperaturas exterior (TN 99) e interiores registradas en la casa nº 15.

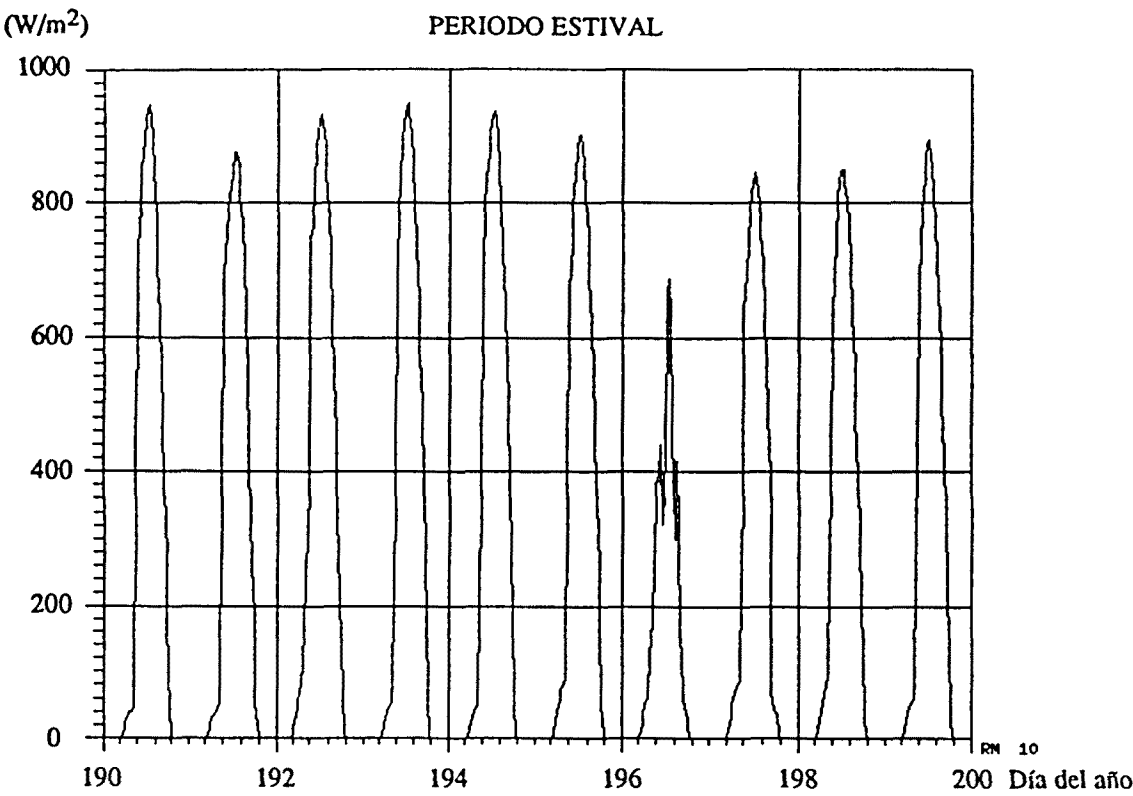


Fig.2.8a: Radiación solar global sobre plano horizontal registrada.

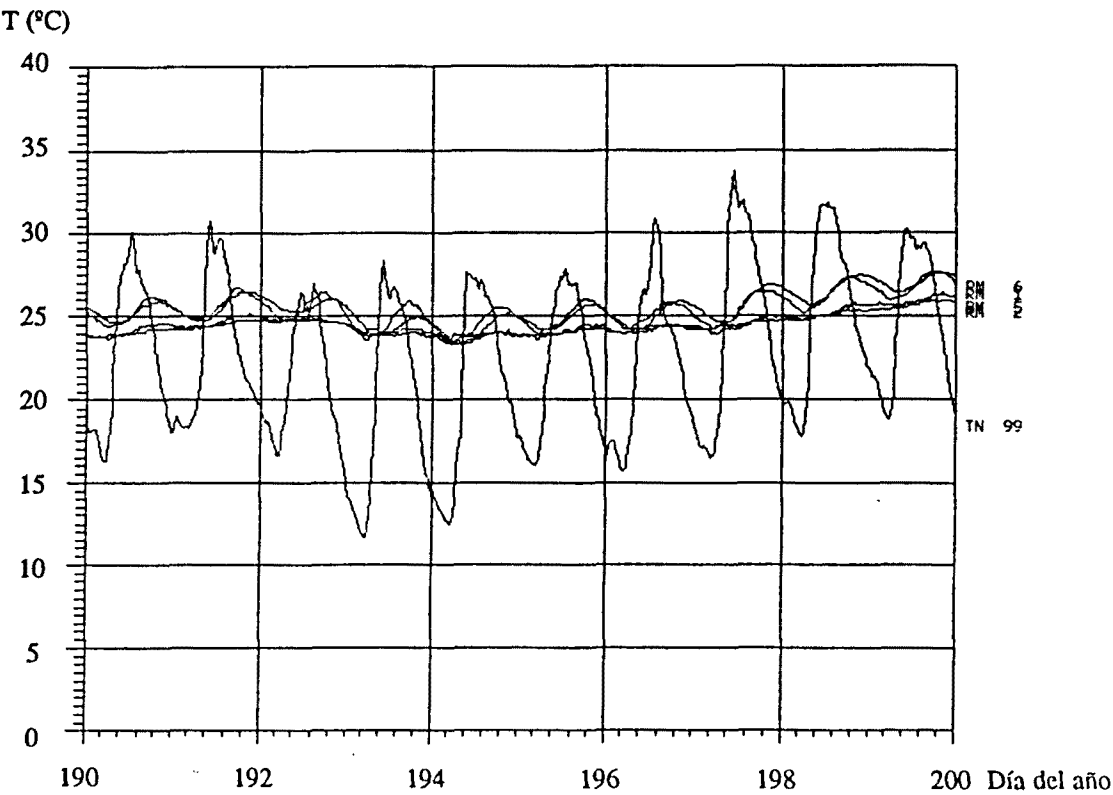


Fig.2.8b: Temperaturas exterior (TN 99) e interiores registradas en la casa nº 15.

situadas a sur y a norte; puede verse, como era lógico esperar, que la temperatura de la habitación sur es siempre superior y más variable (debido a la influencia del sol) que la norte, aunque en periodos fríos la tendencia puede invertirse, seguramente como consecuencia de encontrarse ésta mejor aislada que la sur, procurando una mejor conservación de la energía.

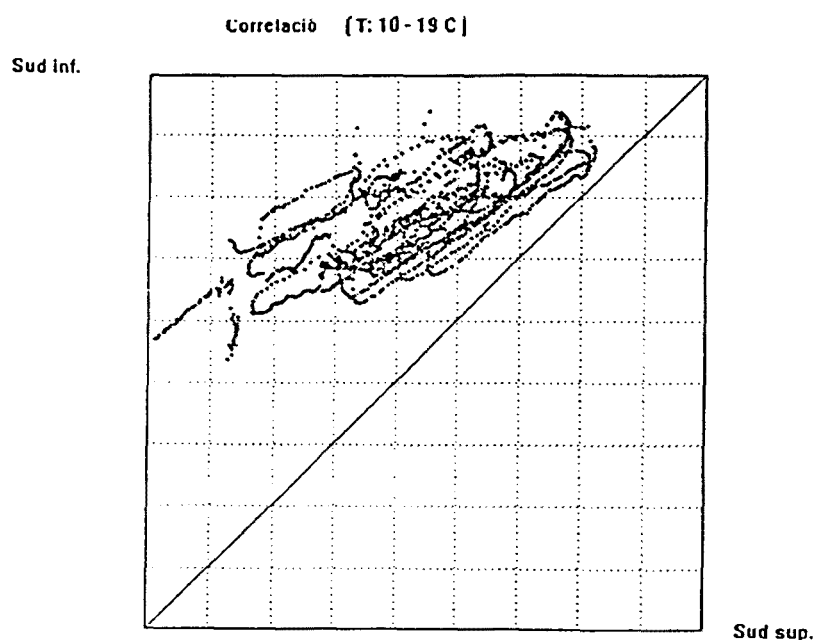


Fig.2.9: Relación entre las temperaturas de las habitaciones sur inferior y superior.

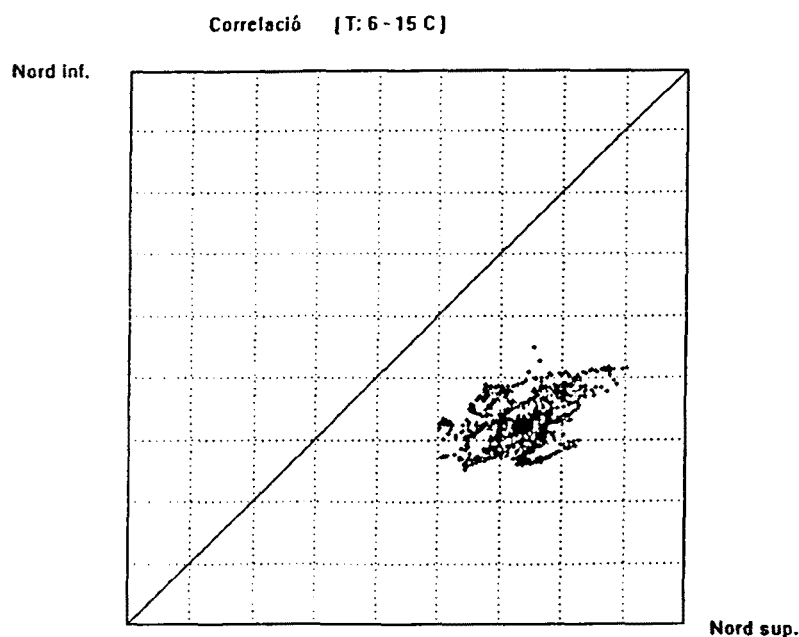


Fig.2.10: Relación entre las temperaturas de las habitaciones norte inferior y superior.

Por último, en la Fig.2.12 se muestra la relación existente entre la estratificación de las dos habitaciones sur y la de las dos habitaciones norte. Puede verse como mientras la diferencia entre las temperaturas de las habitaciones a norte se mantiene casi constante alrededor de 2.5 y 3.5 °C (recordar que la inferior corresponde a la cocina, con el efecto ya comentado), la diferencia entre las habitaciones a sur es tremendamente variable (entre 0.5 y 5°C) debido a la influencia del Sol y a las pérdidas por el techo.

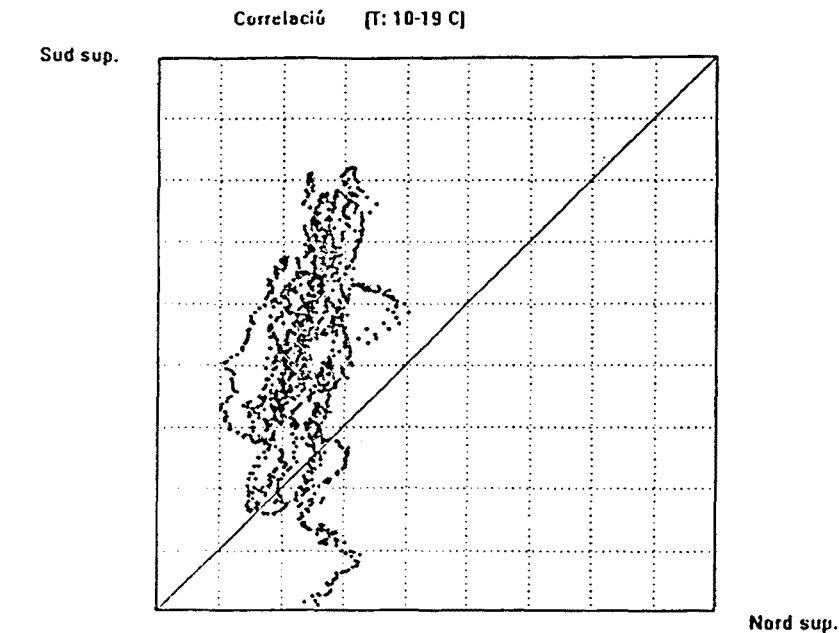


Fig.2.11: Relación entre las temperaturas de las habitaciones superiores norte y sur.

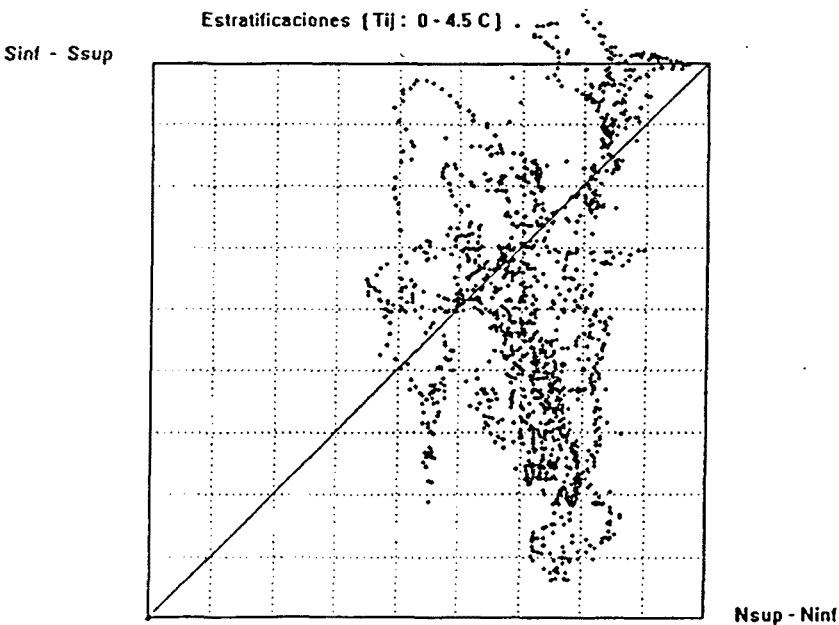


Fig.2.12: Diferencia de temperaturas entre las habitaciones sur inferior y superior con relación a la diferencia entre las habitaciones norte superior e inferior.

2.4.4 Resultados de las encuestas pasadas a los usuarios.

Con la finalidad de conseguir información acerca de aspectos tales como

- perfil de ocupación,
- consumo de energía auxiliar,
- grado de confort alcanzado,
- participación de los usuarios en el control de los sistemas solares de la vivienda,

se pasaron a cada una de las familias diversas encuestas. Los resultados obtenidos, a pesar de las necesarias aproximaciones en algunos de los puntos considerados (p.e. consumo diario de leña), proporcionaron un conocimiento suficientemente válido de estos aspectos. Un resumen de ellos puede verse en la Tabla 2.4. Su análisis fue objeto de un trabajo anterior [2], por lo que aquí sólo comentaremos los aspectos más destacados.

En la Fig.2.13 se presentan de forma gráfica, los resultados de la opinión de los usuarios sobre el grado de confort alcanzado en las viviendas, tanto en invierno como en verano. Puede apreciarse una ligera mejor evaluación de las viviendas para las condiciones de invierno, lo cual podría deberse a algunos problemas de sobrecalentamiento aparecidos en algunas viviendas durante el verano, especialmente en las de patio cubierto.

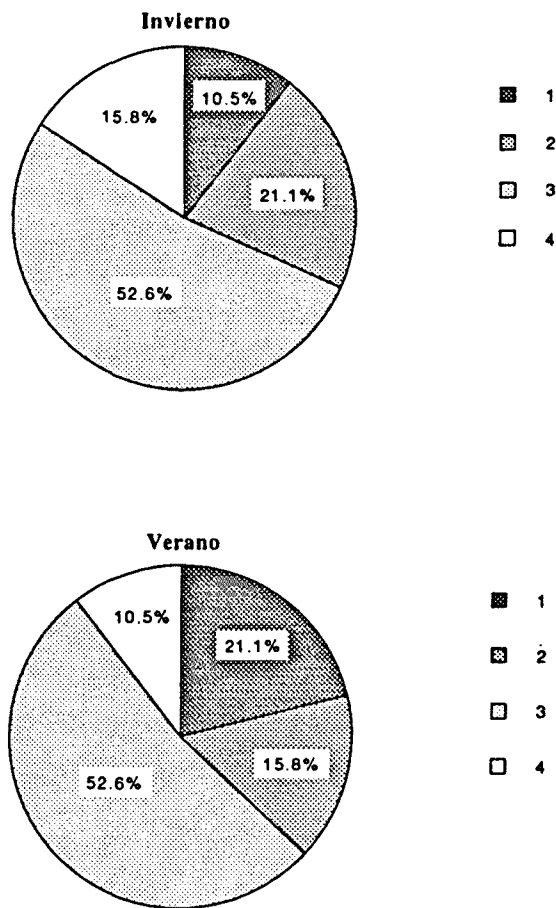


Fig. 2.13: Estimación por parte de los usuarios del grado de confort alcanzado en las viviendas, (0: muy malo, 1: malo, 2: normal, 3: bueno, 4: muy bueno).



Tabla 2.4: Resultados obtenidos en el seguimiento del conjunto bioclimático de Begues [2].

	Vivienda nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
a	Tipología	P	P	T	T	T	T	C	I	I	I	I	I	T	T	T	T	C	I	I	I	
b	Nº habitantes	2	2	3	3	4	2	3	2	4	4	2	3	4	4	0	3	2	5	7	1	
c	Profesión marido/mujer	E/-	W/E	W/D	E/E	B/D	E/E	E/E	E/E	W/D	E/-	W/D	E/D	W/D	W/D	-/-	W/D	W/W	E/E	W/E	W/-	
d	Nivel de confort: ver./inv.	3/3	2/1	3/3	3/3	4/4	3/3	3/3	2/3	4/4	3/3	3/3	3/3	1/2	2/2	-/-	1/1	3/3	3/1	4/1	2/2	
e	Perfil ocupación (pers./día)	1.5	1.7	1.8	1.9	2.8	1.7	1.8	1.25	3.1	2.3	1.7	1.4	2.7	2.2	0.1	1.5	1.6	2.1	5	0.45	
f	Ventilación invernal	1	3	5	2	4	6	4	5	4	4	5	4	4	4	1	1	3	7	7	1	
g	Cerramiento de ventanas a norte y persianas a sur	No	Sí	A veces	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	A veces	Sí	Sí	No	Sí	A veces	y	Sí	
h	Consumo de leña (kg/día)	0	12	6	2	1.7	1.5	23	8.3	5.5	5	1.5	8	22	0	0	3	2	5	1.5	0	
i	Consumo medio anual de electricidad (kW-h/mes)	395.7	346.9	323.5	330.8	379.9	352.7	534.1	195.1	294.5	256	369.2	242.9	357.7	485.1	203.6	275.2	277.6	72.6	386.6	23.9	
j	Consumo medio estival de electricidad (kW-h/mes)	339.6	237.1	222.4	208.7	291.6	281.6	376.3	147.8	221.2	224.2	369.9	202	294.1	322.3	194.4	218.7	130.5	10.7	342.5	3.7	
k	Variación del consumo eléctrico invern. (%)	Nov. -11.5 Dic. 56.4 Ene. 36.3 Feb. 105.4 Mar. 11.6	66.2 115.2 101.7 103 104.1	64 76.1 97.3 154.2 83.5	78.6 83.1 106.6 145.7 91.3	46.9 71.3 85.7 117.5 62	55.7 59.5 70.7 65.9 31.3	74.5 105.6 118.2 109.3 40.7	74.5 105.6 118.2 109.3 40.7	37 112.5 113.2 127.7 48.5	61.5 72.5 88.2 76.6 47.3	43.7 33 46 35.2 13.4	0.9 43.5 16.3 8.7 -15	34.1 35.9 60.2 58.5 32.7	32.6 28.5 71.4 57.1 17.3	116.2 150.2 89.7 97.2 83	3.2 16.6 28.6 27.3 -10.4	30.6 91.6 88.5 118.8 41.9	163.5 254.7 170.6 88.9 6.8	944.4 7146 -100 -100 200	20.2 25.8 40.5 43.6 1500	14.1 2614 2301 2794 281.7
l	Consumo iluminación + aparatos eléc. (kW-h/día)	1750	750	300	300	2000	800	560	1800	600	800	1500	350	1200	600	20	600	1200	200	1500	500	
m	Observaciones	Subsidiario			No lazo convectivo		Ruidos	Secadora		Ruidos				No lazo convectivo	Puerta entrada	Seguimiento			No control diario	Control solar	Sin ocupar	

Cuestión a: P, patio cubierto; T, Trombe; I, invernadero adosado; C, convencional.

Cuestión c: E, empleado oficina; W, operario; D, labores domésticas; B, negocios.

Cuestión d: 0, muy malo; 1, malo; 2, normal; 3, bueno; 4, muy bueno.

Cuestión f: 0, nunca; 1, a veces 1h; 2, 15' a la semana; 3, 4h a la semana; 4, 30' al día; 5, 1h al día; 6, 2h al día; 7, 3h al día.

A partir de los resultados de la Tabla 2.4 se ha realizado una síntesis, presentada en la Tabla 2.5, que creemos significativa del consumo de energía auxiliar habido en las viviendas durante el periodo invernal. No se ha tenido en cuenta en el análisis, los consumos de las casa 15, 18 y 20 por circunstancias de ocupación anómalas. Para cada una de las tipologías solares se presenta: 1) la media (mensual) invernal del consumo eléctrico destinado a calefacción, obtenido a partir de la diferencia del consumo eléctrico (mensual) a lo largo del año menos el del verano, 2) la media del consumo mensual de leña durante el invierno y 3) el consumo total invernal, estimado a partir de los datos anteriores y calculado como suma del primero más el 50% del segundo (valor éste que correspondería al rendimiento del hogar). Puede verse como el mayor consumo corresponde a la tipología convencional o de ganancias directas, mientras que el menor corresponde a la tipología de muro Trombe, seguida de cerca por la de invernadero y algo más alejada por la tipología de patio cubierto. A pesar de la prudencia con que, debido a diversos factores (pequeño tamaño de alguna de las muestras analizadas, no haber tenido en cuenta las ganancias internas, etc.), hay que tomar los anteriores valores, creemos significativo el resultado obtenido. Más adelante, volveremos a él.

Tabla 2.5: Síntesis del consumo mensual de energía auxiliar para las distintas tipologías solares.

Tipología solar	Consumo invernal calefacción eléc. (kW-h/mes)	Consumo invernal de leña (kg/mes)	Consumo invernal total (MJ/mes)
Trombe	95	100	907
Invernadero	48	170	1133 (1.25)
Patio cubierto	83	180	1312 (1.45)
Convencional	153	375	2667 (2.94)

Los números entre paréntesis indican la relación entre el consumo considerado y el correspondiente a la tipología de muro Trombe.

2.4.5 Estudio termográfico de las viviendas.

En todo edificio a menudo existen contribuciones energéticas importantes debidas a deficiencias localizadas que, a través de los datos aportados por sondas localizadas, son imposibles de detectar y más de evaluar a nivel global del edificio. Es por ello, que como soporte del diagnóstico energético de las viviendas del conjunto bioclimático de Begues y dentro del trabajo de seguimiento realizado [3], se utilizó la termografía infrarroja que permitió recoger información acerca de aspectos tales como:

- estado general y defectos en los aislamientos térmicos,
- presencia de puentes térmicos,
- infiltraciones de aire,
- funcionamiento de los sistemas y componentes solares.

La prueba termográfica se realizó el día 2 de diciembre del 1990 a partir de las cuatro de la tarde, con condiciones meteorológicas depresionarias, siendo el día nublado, húmedo y frío (temperatura media del aire 10 °C y humedad relativa del 70%). El equipo termográfico utilizado fue un Hughes-Probeys 3300.

De la interpretación de las imágenes termográficas registradas hay que destacar, en general, el buen nivel constructivo desde el punto de vista térmico del conjunto de la obra realizada, donde prácticamente no existen aspectos significativos que reseñar. Solamente, tal como muestra la Fig. 2.14, en la pared lateral de la casa nº 7 (correspondiente a la tipología

convencional) se observa un defecto en el aislamiento térmico, que correspondería a un gran foco de pérdida de energía, y que nos permite explicar, al menos en parte, el gran consumo energético de esta vivienda, no justificable desde el punto de vista del perfil de ocupación. Así, mientras el consumo eléctrico medio anual correspondiente a esta vivienda, es de 534 kW-h/mes, la media del conjunto es de 340 kW-h/mes, mientras que el de leña es de 23 kg/mes sobre 6.3 kg/mes de media del conjunto (ello explicaría, también, la gran diferencia existente entre el consumo invernal de energía auxiliar correspondiente a la tipología convencional, con relación al de las otras tipologías, hallado en la Tabla 2.5).

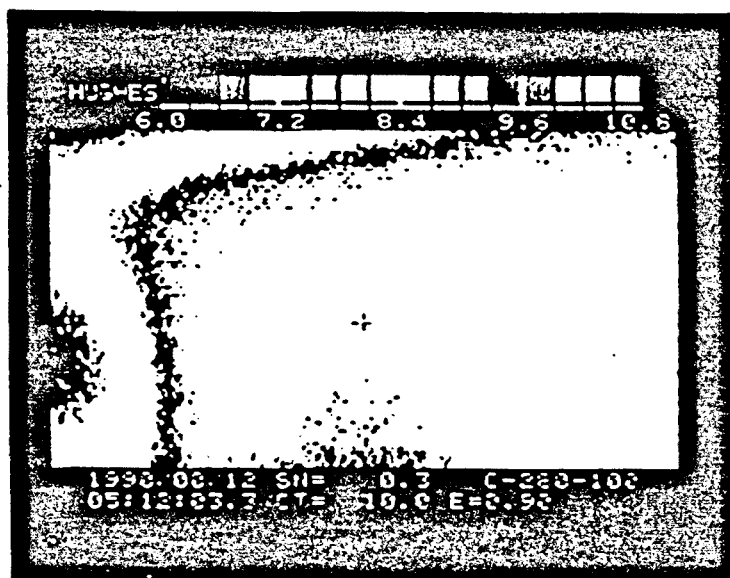


Fig.2.14: Imagen termográfica de la pared lateral de la vivienda nº 7.

Otro detalle interesante es el mostrado por el termograma de la Fig. 2.15. En él puede apreciarse la conexión existente entre el muro de hormigón de la fachada sur de la casa nº 15 y las paredes medianeras de separación entre las viviendas. Posiblemente, ello sea debido al hecho de que estas paredes están también construidas de hormigón, lo cual facilita, gracias a la bondad conductora del hormigón y a un efecto de aleta, la transmisión de calor por conducción hacia el interior del edificio.

La Fig. 2.16 corresponde a una vivienda con tipología de patio cubierto. En medio de la imagen pueden observarse las importantes pérdidas térmicas existentes a través del policarbonato que forma la cubierta de estos patios, que pone en evidencia la necesidad de mejorar su aislamiento térmico durante las noches invernales, así como, la protección necesaria en el periodo estival.

En el análisis termográfico, también, se han constatado otras hipótesis ya esbozadas, con antelación, por el equipo de seguimiento, como son: el no funcionamiento del conducto de conexión entre la fachada sur y las habitaciones norte (debido a errores en la fase constructiva) y la prácticamente nula operatividad de las rejillas de conexión entre los muros Trombe y el espacio interior de la vivienda (funcionando, por tanto, estos únicamente como muros captadores).

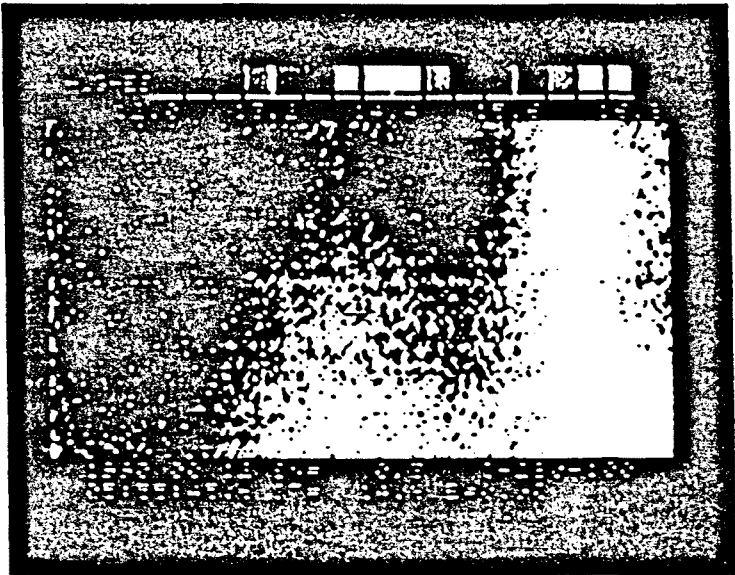


Fig.2.15: Imagen termográfica de la conexión existente entre la fachada sur y la pared medianera (vivienda nº 15).

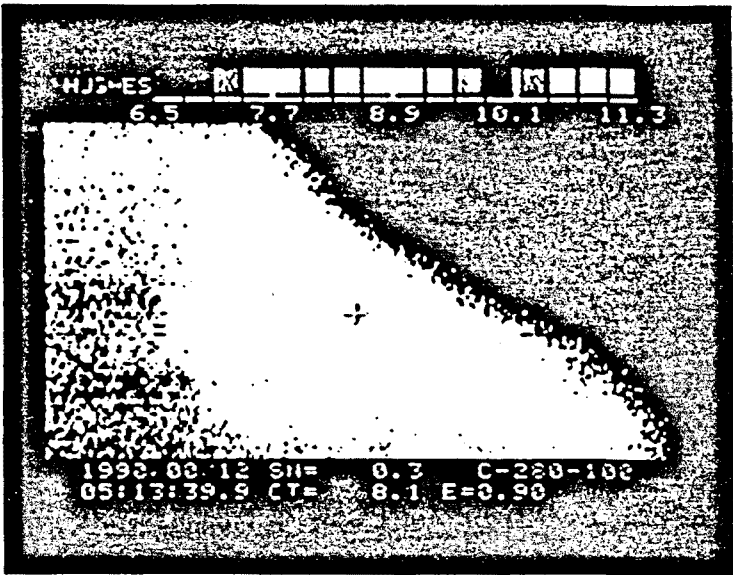


Fig.2.16: Imagen termográfica de la cubierta de policarbonato existente en las viviendas de patio cubierto (casa nº 2).

## 2.5 Evaluación del comportamiento térmico de las viviendas.

El estadio final de una labor de seguimiento como la aquí realizada, consiste, que duda cabe, en la evaluación del comportamiento térmico de las viviendas consideradas, que en este caso son las que conforman el conjunto bioclimático de Begues. La existencia, en éste, de las diversas tipologías solares definidas comportará, también, la posibilidad de realizar la comparación de su rendimiento energético. Finalmente, es interesante comentar la existencia de posibles patologías observadas, proponiendo mejoras a introducir en futuras promociones de viviendas bioclimáticas. Su desarrollo forma parte del contenido de los Capítulos 4 y 5 de esta Tesis Doctoral.

Para un mejor cumplimiento de esos objetivos se creyó necesario realizar un trabajo de modelización térmica de las viviendas estudiadas, lo cual iba a permitir la simulación de su comportamiento y el estudio de la influencia de diversas variables involucradas en el proceso, de una forma más controlada que la que es posible obtener en una experiencia de campo. Para ello se dispuso de un programa de cálculo el elaborado por el Groupe de Recherche en Énergie Solaire (G.R.E.S.) de la Ecole Polytechnique de la Universidad de Lausanne, denominado PASSIM. Éste utiliza el método denominado de descomposición nodal, en el cual se subdivide el edificio a analizar en un número limitado de elementos (en nuestro caso 99), los cuales se consideran sometidos a solicitaciones térmicas similares. A partir de los datos que definen las condiciones exteriores (insolación solar y temperatura, como mínimo) es posible obtener, a lo largo del periodo de tiempo considerado, las temperaturas de cada uno de los nodos de la descomposición, así como, los distintos intercambios habidos entre ellos. Posteriormente, esa información permite realizar un análisis pormenorizado del comportamiento térmico del edificio considerado.

En una etapa final, los resultados obtenidos en este apartado de modelización térmica se compararán con los datos procedentes del seguimiento realizado, obteniéndose información, para cada una de las tipologías solares consideradas, acerca del consumo de energía auxiliar y del ahorro energético obtenido gracias al aprovechamiento de la energía solar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. **Institut Català d'Energia.** "Resultats i conclusions del comportament energètic del Conjunt Bioclimàtic de Begues". Secció de Física del Vallès, ETSAV, Sant Cugat. 1992.
2. **Cusidó, J.A., et al.** "Users Response and Energy Consumption Profile in Bioblimatic Architecture" en Architecture and Urban Space, PLEA-91, Ed. por S.Alvarez. Kluber Academic Publishers. Dordrecht. 1991.
3. **Jorge, J., et al.** "Monitoring Support Provided by Thermal Imaginery". Working Group on the Evaluation of Active and Passive Solar Projects, 16th-18th October 1991, Abingdon, Gran Bretaña.

**CAPÍTULO 3**

**PASSIM: UN PROGRAMA GENERAL DE SIMULACIÓN  
DE SISTEMAS SOLARES PASIVOS.**

## **CAPÍTULO 3: PASSIM, UN PROGRAMA GENERAL DE SIMULACIÓN DE SISTEMAS SOLARES PASIVOS.**

---

### **3.1 La simulación del comportamiento térmico de edificios.**

La simulación de edificios solares pasivos surge de la necesidad de profundizar en el conocimiento del comportamiento térmico de éstos, poniendo a nuestra disposición un instrumento de trabajo extremadamente útil para su análisis.

Son numerosos los programas de simulación térmica de edificios existentes, pudiéndose dividir, en función del método utilizado, en dos grandes bloques: los que se basan en la descomposición del edificio en elementos sometidos a prestaciones térmicas similares, denominados nodos [1-3] y los que se basan en modelos de cada uno de los distintos elementos funcionales del propio edificio que posteriormente se interconectan entre sí [4].

Dentro del bloque de los que operan mediante descomposición nodal existen distintas estrategias de análisis. Aquellos [3] en los que es el propio programa el que, a partir de una exhaustiva definición de la configuración geométrica del edificio estudiado, trata de realizar la descomposición nodal, o aquellos [1,2] en los que ésta es hecha por el propio usuario. En los primeros, la definición del problema es pesada y sujeta a errores, presentándose problemas de versatilidad. El programa PASSIM, que se halla entre los segundos, presenta algunas interesantes ventajas con relación a otros programas:

- utiliza un método de descomposición nodal muy versátil,
- permite la construcción de modelos con un número de nodos considerable (99), que en otros programas es una importante limitación,
- tiene definidos la mayoría de los distintos tipos de intercambio por transmisión de calor posibles : conducción, convección, radiación, estratificación, cambio de fase.
- permite la definición de distintos tipos de nodos: flotante, asignado, regulado,...
- incluye un procesador de radiación que permite el cálculo de la radiación solar incidente sobre un plano con cualquier orientación e inclinación, etc.

A continuación, describiremos brevemente las bases del funcionamiento de este programa, así como, su modo de operación [1].

### **3.2 Resumen del funcionamiento del programa PASSIM.**

En la Fig.3.1 se presenta un esquema general del funcionamiento del programa PASSIM. Como puede verse, existen dos ficheros conteniendo los datos de entrada necesarios para el funcionamiento del programa: el fichero de configuración y el de tabulaciones. En el primero deben de especificarse todos aquellos datos necesarios para la definición del problema y que constituyen el modelo físico-matemático del edificio a estudiar: nodos, enlaces térmicos, fuentes de calor, tiempo e intervalo de simulación, condiciones iniciales, etc. Mientras que en el segundo figurarán todos aquellos datos, disponibles en forma tabulada, que fijan las



condiciones de frontera del problema: los datos meteorológicos (p.e. insolación, temperatura y humedad del aire exterior a lo largo del periodo de tiempo considerado), nodos asignados (p.e. temperaturas medidas experimentalmente) u otros.

Una vez ha sido definida la configuración, todavía, es posible modificarla de forma interactiva, con lo cual se facilita el estudio de la influencia de distintas variables. Con relación a los datos de salida, el programa permite la obtención de los resultados en distintas formas:

- representaciones gráficas en función del tiempo de: temperaturas, flujos caloríficos...
- representaciones biparamétricas
- salida alfanumérica, sobre un terminal cualquiera o sobre un fichero, de: tabulaciones, balances, ...
- almacenamiento sobre un fichero de todos los resultados obtenidos.
- archivar un fichero de configuración que ha sido modificado a lo largo de la ejecución.

Pasaremos, a continuación, a describir, más detalladamente, el contenido del fichero de configuración, así como, el algoritmo de cálculo utilizado para la resolución del sistema de ecuaciones resultante.

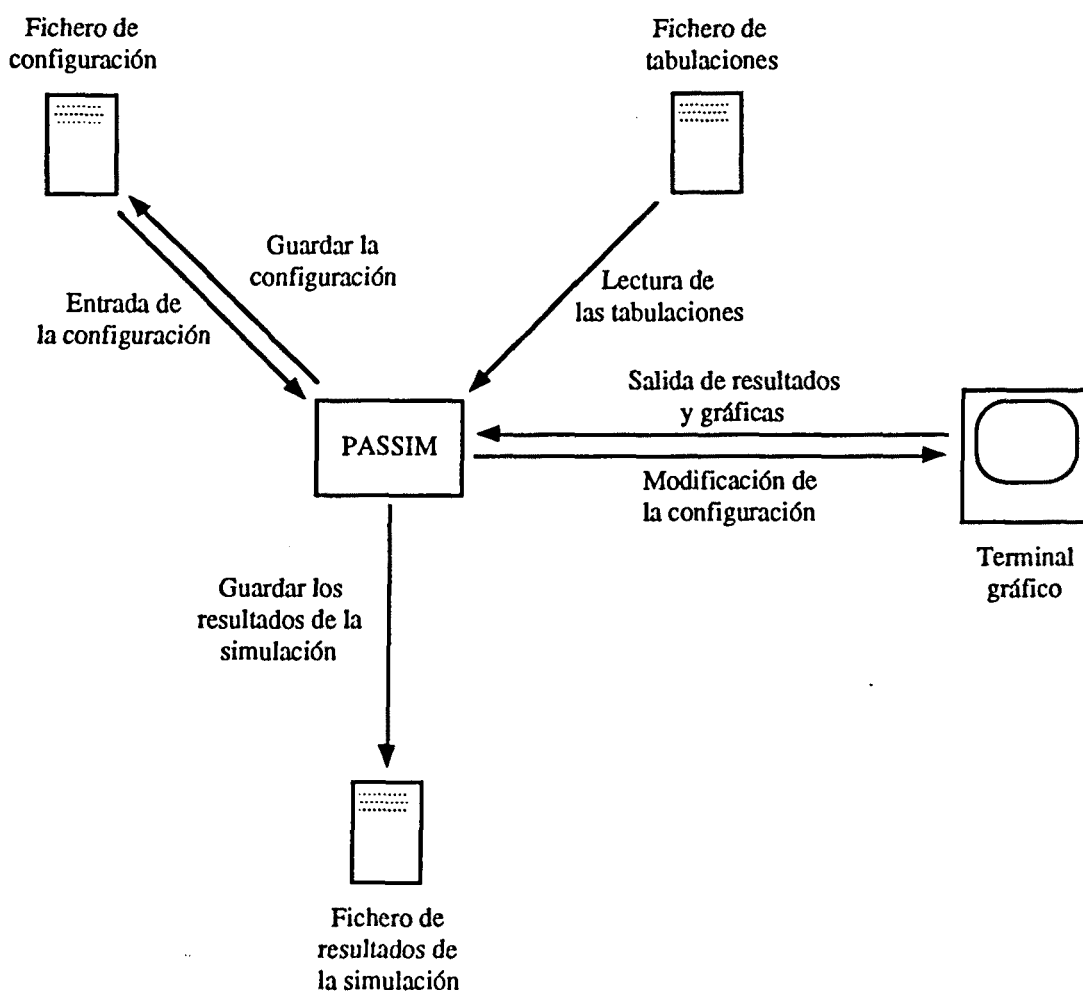


Fig.3.1: Esquema general de funcionamiento del programa PASSIM.

### 3.2.1 Fichero de configuración.

Como ya hemos dicho, en el fichero de configuración se harán constar todos los parámetros necesarios para la definición del modelo físico-matemático del edificio considerado. En el caso del PASSIM, que opera mediante la descomposición nodal del sistema estudiado, la primera operación a realizar es la de su división en una serie de elementos, cada uno de los cuales, pueda ser considerado, al menos de forma aproximada, sometido en todo su conjunto a las mismas condiciones térmicas (misma temperatura, flujo calorífico, fuentes de calor, etc).

Una vez realizada la subdivisión en nodos del sistema estudiado, se establecerán sus relaciones, a partir de la definición de los diferentes enlaces, función de aquellos intercambios por transmisión de calor existentes entre ellos. En este apartado, se incluirán, también, todos aquellos aportes de calor exterior a un nodo determinado, como pueden serlo la radiación solar absorbida o las fuentes de energía auxiliar. Después, pueden definirse todas aquellas operaciones que se consideren oportunas, exteriores a la gramática interna del programa. Y finalmente, se definirán todas aquellas variables que quieran ser registradas para su posterior inclusión en el fichero de datos de salida del programa.

A continuación, describiremos, con algo más de detalle, las variables anteriores:

#### 3.2.1.1 Nodos.

Un nodo es una parte o elemento del edificio a modelizar que pueda considerarse sometido a las mismas solicitaciones térmicas (temperatura o flujo calorífico). Evidentemente, la elección de los nodos es el punto más delicado en una modelización nodal (precisamente este punto será objeto de un detallado estudio en el Capítulo 4).

Son varios los tipos de nodos que pueden definirse, función del tipo de solicitud térmica a que se encuentra sometido:

- **nodos flotantes:** en ellos su temperatura es desconocida y deberá de determinarse a partir de la resolución del sistema de ecuaciones resultante de establecer los balances de energía en cada uno de los nodos de este tipo.
- **nodos asignados:** en ellos su temperatura o está fijada o está tabulada en función del tiempo; ejemplos de cada tipo pueden ser, respectivamente, la temperatura del terreno o la temperatura del aire exterior.
- **nodos regulados:** similares a los flotantes, pero en ellos se limita su variación a un intervalo fijado previamente; sería p.e. el caso de la regulación de la temperatura de una habitación por medio de un termostato. En este caso, la temperatura del aire de la habitación puede fluctuar libremente, siempre que no se supere el intervalo de variación fijado por el termostato. Su temperatura, al igual que para los nodos flotantes, debe de ser calculada en cada instante.

Adicionalmente, a cada nodo deberá de asignársele, como mínimo, una capacidad térmica y una temperatura inicial.

#### 3.2.1.2 Enlaces.

Cada uno de los nodos o elementos del edificio considerado debe de relacionarse con el resto por medio de un conjunto de enlaces, función del tipo de intercambio energético. Estos pueden ser de los siguientes tipos:

- **enlaces conductivos** (denominados GM): que pueden ser definidos mediante la relación

$$Q_{ij} = G_{ij} \cdot (T_i - T_j) \quad (3.1)$$

en donde,  $G_{ij}$  es la conductancia térmica. Este tipo de enlace permite expresar intercambios por conducción unidimensional pura, en donde,  $G_{ij}$  vale entonces

$$G_{ij} = \frac{\lambda}{e} \cdot A \quad (3.2)$$

pero también, pérdidas debidas a las infiltraciones, valiendo  $G_{ij}$  en este caso

$$G_{ij} = \delta \cdot V \cdot \frac{NRH}{3600} \cdot c \quad (3.3)$$

en donde, NRH es el número de renovaciones por hora del espacio considerado.

- **enlaces convectivos**: que pueden expresarse por medio de la relación

$$Q_{ij} = H_{ij} \cdot (T_i - T_j)^n \quad (3.4)$$

en donde,  $H_{ij}$  y  $n$  toman distintos valores, en función del tipo de convección que se presente. Así, para el caso de convección natural sobre paredes planas horizontales o verticales y entre planos paralelos verticales (enlaces denominados HM),  $H_{ij}$  será el coeficiente superficial de transmisión de calor por convección, calculado a partir de las expresiones de Nusselt correspondientes dadas por [5] y en este caso  $n$  será igual a 1. Mientras que para el caso de transmisión de calor por convección natural a través de aberturas (intercambios interzonales o enlaces tipo VM),  $n$  será igual a 3/2 y  $H_{ij}$  valdrá según [6-8]

$$H_{ij} = 63.5 \cdot l \cdot h^{3/2} \quad (3.5)$$

en donde,  $l$  y  $h$  son, respectivamente, la anchura y altura de la abertura correspondiente.

- **enlaces radiativos** (o enlaces RM): que evalúan el intercambio de calor por radiación térmica y vienen expresados mediante la relación

$$Q_{ij} = \sigma \cdot R_{ij} \cdot (T_i^4 - T_j^4) \quad (3.6)$$

en donde,  $\sigma$  es la constante de Steffan-Boltzmann y  $R_{ij}$  toma el valor dado por [9]

$$R_{ij} = \left( \frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i \cdot A_i} + \frac{1-\epsilon_j}{\epsilon_j \cdot A_j} + \frac{1}{A_i \cdot F_{i-j}} \right)^{-1} \quad (3.7)$$

en donde,  $\epsilon_i$ ,  $\epsilon_j$ , y  $A_i$ ,  $A_j$  son las emisividades y áreas de cada una de las superficies que están intercambiando calor por radiación, mientras que  $F_{i-j}$  es el factor de vista entre ellas, que responde a la expresión

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos(\theta_i) \cdot \cos(\theta_j)}{\pi \cdot r_{i-j}^2} dA_i \cdot dA_j \quad (3.8)$$

Hay que mencionar que la expresión de  $R_{ij}$  adoptada por el programa PASSIM, corresponde, según [10], a un caso simplificado de intercambio de calor por radiación entre dos superficies gris-difusas en el que no se considera la influencia, por reflexión de la radiación, en terceras superficies.

Dentro del código PASSIM existe el programa AIRES [11], para la determinación de los factores de vista a partir de la expresión (3.8), sin embargo, presenta el grave inconveniente que sólo contempla el cálculo de los factores de vista entre superficies rectangulares. Además, el método utilizado para la integración numérica es lento y poco preciso. Ante esta limitación, y teniendo en cuenta que en los edificios que más tarde modelizaremos, se presentaban casos en los que no es posible realizar el cálculo del factor de vista a partir de esa geometría, nos vimos obligados a elaborar nuestro propio programa de cálculo de factores de vista. En el Apéndice A se presentan las bases de cálculo utilizadas.

- **enlaces por aporte de calor exterior** (denominados EM): se utilizan para simular el aporte de calor, a un nodo determinado, a partir de una fuente de calor exterior, como pueden serlo: la radiación solar incidente, una fuente de energía auxiliar o una ganancia interna.
- **enlaces por aporte de calor exterior termostatzado** (denominados CM): semejantes a los anteriores, se diferencian de ellos en que en éstos puede definirse una directiva, que en función del tiempo, comanda la puesta en marcha y parada de la fuente de calor exterior. Un ejemplo podría ser una fuente de energía auxiliar comandada mediante un termostato.
- **enlaces por estratificación** (denominados SM): permiten la conexión entre dos nodos entre los que existe un intercambio de calor y de masa como consecuencia de la estratificación. Este caso se presenta cuando entre dos nodos de aire, situados uno encima del otro, el que está en posición inferior se encuentra a mayor temperatura.
- **enlaces por transferencia de masa** (denominados MM): establece la conexión de dos nodos entre los que se presenta una transferencia de masa, como p.e. el flujo de vapor de agua del aire de una habitación hacia una pared o aislamiento.

### 3.2.1.3 Operaciones diversas.

Además de los nodos y enlaces que acabamos de describir, el programa PASSIM contiene subrutinas para la evaluación, entre otros, de:

- la radiación solar incidente (global, directa y difusa) sobre una superficie con cualquier orientación e inclinación, a partir de los valores tabulados de radiación solar global sobre un plano horizontal o vertical. El programa permite el uso de tres tipos de correlaciones distintas: la de Liu-Jordan, la de Boes y la de Hottel-Bugler.

- los ángulos solares: altura y azimut del Sol, ángulo de incidencia y sus proyecciones horizontal y vertical.
- la temperatura del cielo, calculada a partir de la correlación de Ineichen.
- la proyección de sombras de un voladizo o de una protección lateral sobre una superficie vertical u horizontal.
- las propiedades radiantes de vidrios ( $\alpha, \rho, \tau$ ) en función del ángulo de incidencia de la radiación solar [9]

y, la definición de cualquier operación mediante un lenguaje interno al programa.

### 3.2.2 Algoritmo de resolución.

Tal como hemos visto en el apartado anterior, en la descomposición nodal de un sistema solar existe un número finito de nodos flotantes y regulados (que denominaremos  $N_f$ ), en los que su temperatura en cualquier instante (salvo el inicial) es desconocida, y un número de nodos asignados en los que ésta es conocida. Ya que sólo la de los primeros es una incógnita, deberemos de escribir un sistema con el mismo número de ecuaciones ( $N_f$ ), que obtendremos de realizar un balance de energía en cada uno de esos nodos. La resolución de ese sistema en diferentes instantes, nos permitirá determinar las temperaturas desconocidas en función del tiempo, a partir de unas condiciones iniciales conocidas.

Consideremos el nodo  $j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, N_f$ ) y supongamos que su temperatura en el instante  $t$  es conocida. Al realizar un balance de energía en el intervalo de tiempo comprendido entre  $t$  y  $t + \Delta t$  (en donde,  $\Delta t$  es el paso de simulación), y considerar el aporte calorífico de los restantes nodos, obtendremos

$$C_j (T_j^{t+\Delta t} - T_j^t) = \sum_{i=1, i \neq j}^{N_f} \int_t^{t+\Delta t} Q_{ij} dt + \int_t^{t+\Delta t} S_j dt$$

siendo,  $C_j = m_j \cdot c_j$ , la capacidad calorífica del nodo  $j$ , y  $S_j$  la potencia exterior aplicada durante el intervalo de tiempo considerado sobre el nodo  $j$ . Linealizando los coeficientes de transmisión de calor para los casos de la convección y la radiación, podremos escribir de forma general

$$Q_{ij} = U_{ij} \cdot (T_i - T_j)$$

en donde,  $U_{ij}$  es el coeficiente global de transmisión de calor. Si además definimos

$$\Delta T_j = T_j^{t+\Delta t} - T_j^t$$

obtendremos al sustituir

$$C_j \Delta T_j = \sum_{i=1, i \neq j}^{N_f} \int_t^{t+\Delta t} U_{ij} (T_i - T_j) dt + \int_t^{t+\Delta t} S_j dt$$

Tomando los valores de  $U_{ij}$  y  $S_j$  correspondientes al instante inicial  $t$ , podremos sacarlos fuera del signo integral, quedando

$$C_j \Delta T_j = \sum_{i=1, i \neq j}^{N_f} U_{ij}^t \int_t^{t+\Delta t} (T_i - T_j) dt + S_j^t \Delta t$$

evidentemente, el error cometido al utilizar esta aproximación es directamente función del tamaño del intervalo  $\Delta t$  de tiempo considerado.

La integral de la ecuación anterior es resuelta en el PASSIM, utilizando el método de Crank-Nicholson [12], de forma que

$$\int_t^{t+\Delta t} T_j dt = 0.5 (T_j^{t+\Delta t} + T_j^t) \Delta t$$

Al sustituir esta aproximación en la ecuación anterior, obtendremos, al desarrollar, el sistema de ecuaciones siguiente

$$\Delta T_j \left( C_j / \Delta t + 0.5 \sum_{i=1, i \neq j}^{N_f} U_{ij}^t \right) - 0.5 \sum_{i=1, i \neq j}^{N_f} U_{ij}^t \Delta T_i = \sum_{i=1, i \neq j}^{N_f} U_{ij}^t (T_i^t - T_j^t) + S_j^t \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, N_f$$

que es un sistema de  $N_f$  ecuaciones lineales con  $N_f$  incógnitas (las  $\Delta T_j$ ), que puede resolverse invirtiendo la matriz de los coeficientes. En general, es necesario calcular e invertir en cada paso de simulación la matriz, ya que los coeficientes  $U_{ij}$  son función de  $t$ . Sin embargo, una opción del programa permite obviar este paso, siempre y cuando, el valor de una temperatura cualquiera no haya variado desde el cálculo anterior, por encima de un valor prefijado. Evidentemente, esta opción permite economizar tiempo de cálculo en detrimento de la precisión en la simulación.

### 3.3 Comentario acerca del PASSIM.

Como hemos visto, el programa PASSIM se basa en la creación de un red nodal para la simulación del comportamiento térmico de un sistema solar, siendo los nodos de esta red los distintos componentes en que éste se puede dividir y sus enlaces, todos los posibles intercambios energéticos establecidos entre ellos. Estos, según se han descrito, se evalúan a partir de las fórmulas más básicas conocidas en la transmisión de calor: la conducción se considera unidireccional, la convección se calcula a partir de expresiones semiempíricas convencionales, la expresión utilizada para el intercambio radiante corresponde a un caso simplificado en el que se tiene en cuenta la influencia que terceras superficies tienen sobre el intercambio (cuando en realidad la radiación es un fenómeno global), etc. Y todo ello, basado en el hecho de la descomposición del edificio en elementos supuestamente sometidos a condiciones uniformes en todo su volumen. La cuestión que nos planteamos ante esta situación, es, ¿hasta qué punto es fiable la modelización térmica de un edificio, con toda su gran complejidad espacial y temporal, mediante un modelo elaborado sobre la base de las anteriores premisas?. A ésta y a otras cuestiones ligadas a ella, intentaremos responder a lo largo del siguiente Capítulo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Morel, N. "PASSIM: Un Programme Général de Simulation de Systèmes Solaires Passifs. Version 4". G.R.E.S. de la Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne, Suisse, 1985.
2. McFarland, R.D. "PASOLE: A General Simulation Program for Passive Solar Energy". Los Angeles Solar Laboratory, UCLA, LASL-LA-8885-MS-1981. Los Angeles, California, EE.UU. 1981
3. Arumi-Noe, F. "DEROB". Department of Architecture, University of Texas, Austin, Texas, EE.UU. 1979.
4. "TRNSYS: A Transient System Simulation Program". Experiment Station, Report 38-11, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, EE.UU. 1981.
5. Kreith, F. "Transmisión de Calor y Termodinámica". 1967.
6. Weber, D.D. y Kearney, R.J. "Natural Convective Heat Transfer Through an Aperture in Passive Solar Buildings". Proc. of the Fifth National Passive Solar Conference, Amherst, Massachusetts, EE.UU. 1980.
7. Balcomb, D. y Yamaguchi, F. "Heat Distribution by Natural Convection". Proc. of the Eighth National Passive Solar Conference, Santa Fe, New Mexico, EE.UU., 1983.
8. Balcomb, D., Jones, G.F. y Yamaguchi, K. "Natural Convection AirFlow Measurement and Theory". Proc. of the Ninth National Passive Solar Conference, Columbus, Ohio, EE.UU., 1984.
9. Duffie, J.A. y Beckman, W.A. "Solar Engineering of Thermal Processes". Wiley-Interscience, New York, 1980.
10. Holman, J.P. "Transferencia de Calor". CECSA, México, 1986.
11. Eriksson, C. "Program AIRES". G.R.E.S. de la Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne, Suisse, 1985.
12. Patankar, S.V. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow". McGraw-Hill, New York, 1980.

**CAPÍTULO 4**

**ANÁLISIS TÉRMICO DE EDIFICIOS MEDIANTE  
EL CÓDIGO PASSIM**



## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS TÉRMICO DE EDIFICIOS MEDIANTE EL CÓDIGO PASSIM

---

### 4.1 Introducción.

El hecho de disponer de los datos del seguimiento del conjunto bioclimático de Begues, nos ofrecía la posibilidad de estudiar hasta qué punto el análisis del comportamiento térmico de un edificio, realizado mediante programas de simulación, como p.e. el PASSIM, es posible. Intentando responder al mismo tiempo, a preguntas como las que nos hacíamos al final del Capítulo anterior: ¿en qué medida los resultados de una modelización de este tipo coinciden con la realidad?, ¿es suficiente este tipo de modelos para abordar el análisis del comportamiento térmico de un edificio?, y, en definitiva, ¿es realmente fiable la modelización térmica de un edificio construido?.

Para poder responder a estas preguntas, se pensó en elaborar el modelo térmico de uno de los edificios del conjunto bioclimático de Begues y contrastar los resultados de la simulación con los correspondientes a los del seguimiento realizado. A tal efecto se eligió la casa nº 15, que, como ya hemos dicho, es desde la cual se llevó a cabo la labor de seguimiento de todo el conjunto. La razón de esta elección es, evidente, por distintos motivos:

- al ser la casa destinada al seguimiento, se pudieron disponer más sondas de medición,
- el hecho de no estar habitada durante este periodo de tiempo, hizo que la existencia de ganancias internas fuera mínima, limitándose éstas a las debidas al equipo de adquisición de datos,
- por la misma razón, al estar la casa deshabitada, las persianas y postigos de las ventanas permanecieron cerrados la mayor parte del tiempo.

con ello se eliminaban dos de las mayores fuentes de indeterminación existentes a la hora de abordar la simulación del comportamiento térmico de un edificio.

Pero antes de pasar a la elaboración del modelo térmico del edificio escogido, nos planteamos la necesidad de estudiar la forma de realizar la descomposición nodal, ya que ésta es una de las cuestiones primordiales a considerar en todo modelo nodal, como lo es el del código PASSIM. Puesto que de la forma de realizar esta descomposición dependerá el grado de fiabilidad de los resultados obtenidos.

### 4.2 Estudio preliminar sobre la descomposición nodal.

A tal fin se diseñaron una serie de experimentos numéricos realizados con el mismo código PASSIM. En su construcción se escogieron distintos elementos o partes del edificio que posteriormente tenía que ser objeto de contrastación experimental, que como ya hemos dicho es el edificio de la casa nº 15 del conjunto bioclimático de Begues, y corresponde a una casa que integra un muro Trombe en su fachada sur.

Los experimentos se plantearon a dos niveles distintos. Un primer nivel en el que se consideraron los elementos a ensayar por separado y un segundo nivel en el que éstos se consideraron integrados en su conjunto arquitectónico correspondiente.

4.2.1 Análisis de la influencia de la subdivisión nodal en distintos elementos arquitectónicos considerados aislados.

En primer lugar, se realizó un estudio sobre la influencia del grado de la subdivisión nodal en la simulación térmica de distintos elementos arquitectónicos por separado y comunes a la mayoría de casas del conjunto, y que fueron elegidos por su particular importancia en el establecimiento de las condiciones térmicas resultantes en esos edificios.

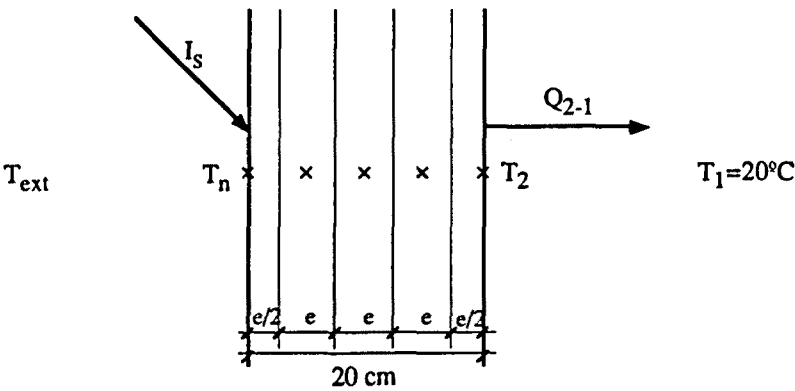


Fig.- 4.1: Esquema de la subdivisión nodal en un muro de hormigón.

Tabla 4.1: Análisis de la influencia de la subdivisión nodal en un muro Trombe de 20 cm de espesor. Capacidad calorífica 400 kJ/m²°C.

Nº nodos	Q <sub>2-1</sub> (MJ)	% error	T <sub>2</sub> media (°C)
1	6.27	28.58	37.9
3	5.23	7.26	35.7
5	5.06	3.75	35.3
10	4.94	1.23	35.1
20	4.88	0	35

La simulación se ha realizado para el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

En la Fig.4.1 puede verse esquematizado el primero de los elementos arquitectónicos ensayados. Se trata de un muro de hormigón sometido por una de sus caras a las condiciones ambientales existentes en el exterior de un edificio y por la otra a las condiciones de confort interior. Para la simulación del ambiente exterior, se tomaron los datos de radiación solar y

temperatura del aire obtenidos en el seguimiento del conjunto bioclimático de Begues para un periodo de la estación invernal, puesto que es, en esta época del año, cuando se presentan los mayores gradientes de temperatura en la estructura del edificio. Para la simulación del ambiente interior se tomó una temperatura del aire constante de 20 °C. El espesor del muro de hormigón elegido fue de 20 cm, ya que es éste el existente en todos los edificios del conjunto.

En la Tabla 4.1 pueden verse los resultados obtenidos para un periodo de simulación de 10 días (el comprendido entre los días 340 y 350). Estos se presentan en términos de la temperatura media  $T_2$ , del elemento del muro en contacto con el aire interior y en términos del calor  $Q_{2-1}$  transferido entre este elemento y el aire interior. Para este último caso se muestra, también, el error cometido con las distintas subdivisiones nodales, tomándose como valor de referencia el correspondiente a una subdivisión del muro en 20 nodos. Puede observarse como el error cometido con una subdivisión en 5 nodos es del orden del 4% del valor de referencia.

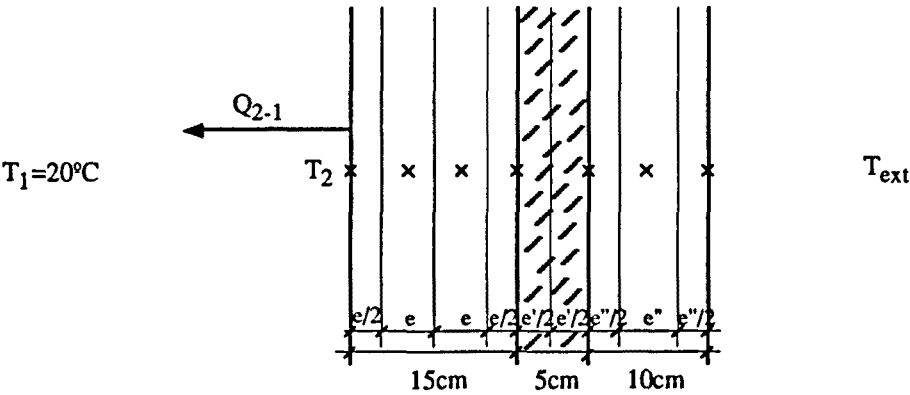


Fig.4.2: Esquema de la subdivisión nodal en una doble pared con aislamiento interior.

Tabla 4.2: Análisis de la influencia de la subdivisión nodal en una doble pared con aislamiento interior. Capacidad calorífica 335 kJ/m<sup>2</sup>°C.

Nº nodos	$Q_{2-1}$ (kJ)	% error	$T_2$ media (°C)
1-1-1	1408	10.43	21.1
1-2-1	1408	10.43	21.1
2-1-1	1364	6.98	21.1
3-1-2	1311	2.82	21
6-2-4	1275	0	21

La simulación se ha realizado para el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

El siguiente experimento numérico realizado, consistió en analizar la influencia de la subdivisión nodal en los muros norte de las casas consideradas. En la Fig.4.2 se muestra un

esquema de la descomposición realizada en este elemento. Como puede verse se trata de muros formados por una doble pared de ladrillo, con un aislamiento entre ellas de 5 cm espesor de poliestireno expandido. Al tratarse de una pared norte, en las condiciones exteriores no se consideró en este caso, la presencia de la radiación solar directa. La temperatura del aire interior se fijó, como en el experimento anterior, constante e igual a 20 °C. En la Tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos para esta situación. En este caso puede verse como sería necesario recurrir a una subdivisión nodal del tipo 2-1-1, para obtener un resultado mínimamente aceptable.

En la Fig.4.3 se esquematiza la configuración del siguiente experimento numérico realizado. Este consiste en el estudio de la subdivisión nodal en un tabique de separación entre dos habitaciones, una de las cuales se considera orientada al sur con un muro de hormigón sometido a la radiación solar directa, mientras que la otra se ha tomado como una habitación orientada al norte. Con esta configuración se ha pretendido que el tabique se encontrara sometido a las máximas solicitaciones térmicas posibles.

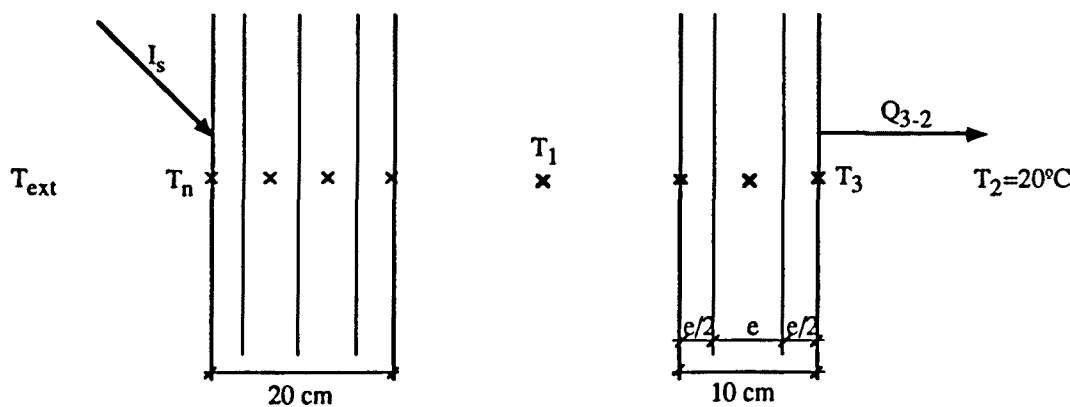


Fig.4.3: Esquema de la subdivisión nodal en un tabique de separación.

Tabla 4.3: Análisis de la influencia de la subdivisión nodal en un tabique de separación. Capacidad calorífica 110 kJ/m²°C.

Nº nodos	Q3-2 (kJ)	% error	T1 media (°C)	T3 media (°C)
1	1101	14.4	31.6	25.7
2	1018	6.3	32.2	26.6 25.4
4	982	2.7	32.5	27 25.2
8	963	0	32.6	27.2 25.1

La simulación se ha realizado para el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

El muro de hormigón de la habitación sur se ha considerado sometido a condiciones exteriores, tanto de radiación solar como de temperatura, mientras que la temperatura de la habitación norte ha sido fijada en un valor constante de 20 °C. La habitación sur se ha

considerado en régimen fluctuante, determinándose su temperatura,  $T_1$ , a partir de las solicitaciones térmicas a las que se encuentra sometida. En la Tabla 4.3 puede verse tabulado el valor medio de esta temperatura, obtenido durante el período simulado, así como los resultados del calor  $Q_{3-2}$  transferido a la habitación norte a través del tabique y de las temperaturas superficiales medias de las dos caras de éste.

En el siguiente experimento numérico se analizó la influencia de la subdivisión nodal en la transmisión de calor a través de una puerta de madera sometida a condiciones exteriores (radiación solar incluida) por una de sus caras y a condiciones interiores por la otra. Un esquema de la descomposición realizada puede verse en la Fig.4.4, mientras que los resultados obtenidos se encuentran resumidos en la Tabla 4.4. Puede comprobarse, en este caso, la extraordinaria influencia que una adecuada subdivisión nodal tiene en la transferencia de calor a través de la puerta, lo cual es debido, en parte, al hecho de que la radiación solar esté incidiendo sobre ella.

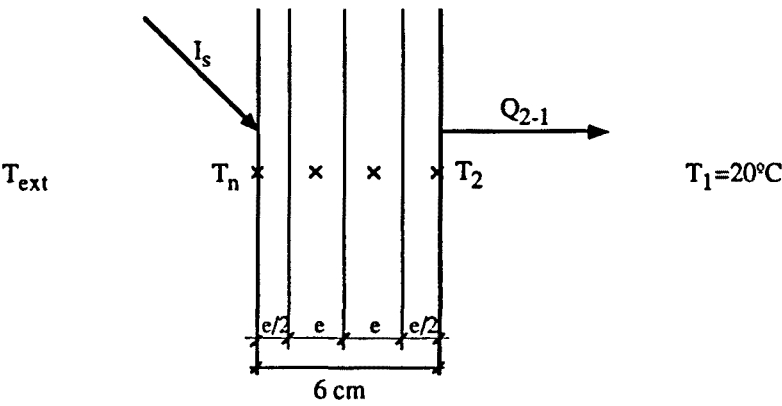


Fig.4.4: Esquema de la subdivisión nodal en una puerta exterior orientada al sur.

Tabla 4.4: Análisis de la influencia de la subdivisión nodal en una puerta exterior orientada al sur. Capacidad calorífica 95 kJ/m<sup>2</sup>°C.

Nº nodos	Q <sub>2-1</sub> (kJ)	% error	T <sub>2</sub> media (°C)
1	6361	104.8	37.2
2	3956	27.4	32.3
4	3343	7.6	31
6	3181	2.4	30.7
8	3105	0	30.5

La simulación se ha realizado para el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

Por último se analizó la influencia de la subdivisión nodal en dos tipos distintos de ventana existentes en las casas que posteriormente analizaremos. En las Figs.4.5a y 4.5b

pueden verse los esquemas nodales de cada una de ellas. En todos los casos se consideraron sometidas por una de sus caras a condiciones ambientales exteriores con incidencia de radiación solar directa. En las Tablas 4.5a y 4.5b pueden verse resumidos los resultados obtenidos para cada uno de los casos considerados. La columna de temperaturas  $T_3$  corresponde a las temperaturas superficiales medias de las dos caras de la persiana o del postigo.

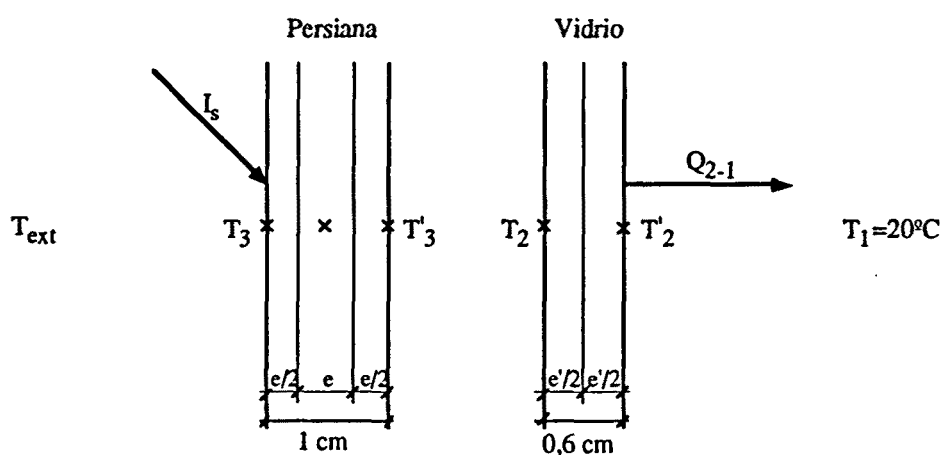


Fig.4.5a: Esquema de la subdivisión nodal de una ventana con persiana exterior.

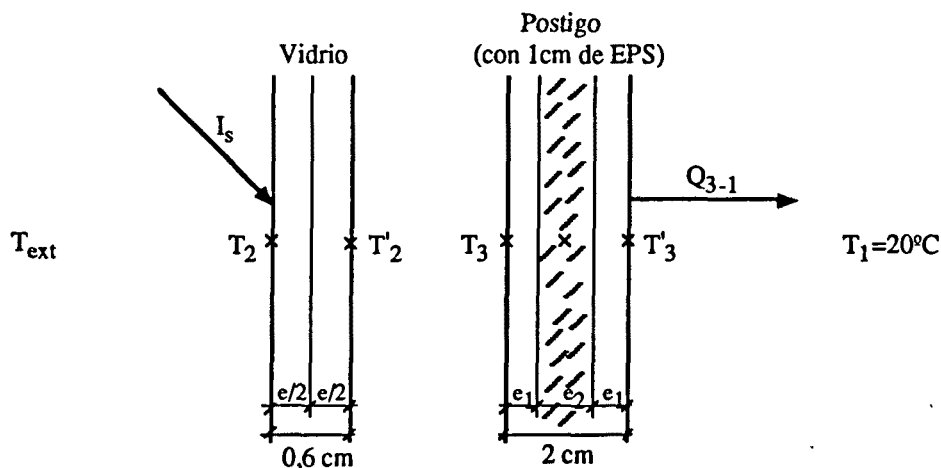


Fig.4.5b: Esquema de la subdivisión nodal de una ventana con postigo interior.

Como se desprende del análisis de los resultados obtenidos en los anteriores experimentos numéricos, la descomposición de un elemento en un número de nodos insuficiente nos conduce a un incremento en la transmisión de calor a través de ese elemento, con errores de magnitud nada despreciables en muchos casos. Estos resultados deberían de servirnos, para poder extraer un criterio que permitiera establecer la subdivisión nodal necesaria a utilizar en el análisis térmico de un edificio mediante el código PASSIM. Sin embargo, por poco que quisiéramos ajustar el análisis, los anteriores resultados nos indican

que el número de nodos necesarios para llevarlo a cabo sería enormemente grande, y evidentemente bastante superior al número máximo posible en ese código, que como ya hemos dicho es de 99.

**Tabla 4.5a:** Análisis de la influencia de la subdivisión nodal en una ventana con persiana.  
Capacidad calorífica 60 kJ/m<sup>2</sup>°C.

Nº nodos	Q2-1 (kJ)	% error	T2 media (°C)	T3 media (°C)	
1-1	2432	31.03	28.5	32.6	
2-1	2069	11.47	27.6	31.2	33.5
3-1	1968	6.03	27.3	30.8	33.8
4-1	1926	3.77	27.2	30.6	33.9
8-1	1860	0.21	27.1	30.4	34.1
8-2	1856	0	27.1	30.4	34.1

La simulación se ha realizado para el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

**Tabla 4.5b:** Análisis de la influencia de la subdivisión nodal en una ventana con postigo.  
Capacidad calorífica 13 kJ/m<sup>2</sup>°C.

Nº nodos	Q3-1 (kJ)	% error	T2 media (°C)	T3 media (°C)	
1-1	5921	71.12	31.6	34.9	
2-1	4773	37.94	34.2	38.7	32.7
1- (1-1-1)	3473	0.37	37	43.2	30.1
1- (1-2-1)	3460	0	37.1	43.1	30.1
1- (1-4-1)	3460	0	37.1	43.1	30.1

La simulación se ha realizado para el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

Podemos encontrar, sin embargo, un camino para solucionar este problema, si tenemos en cuenta que, si bien, el error cometido en la evaluación del calor transferido a través de un elemento aislado de nuestro edificio, por el hecho de subdividirlo en un número de nodos demasiado pequeño, puede ser grande; en la medida que lo consideremos integrado en su entorno arquitectónico, puede que ese error, traducido en términos de temperatura del aire de una dependencia determinada, sea totalmente aceptable. Dicho de otra forma, la transferencia de calor a través de un muro Trombe, con una gran superficie de captación, seguramente siempre será de un orden de magnitud superior a la que pueda haber a través de una puerta o ventana, con áreas de intercambio menores, o a través de un tabique de separación interior, sometido a un gradiente de temperatura mucho menor. De forma correspondiente lo será el

orden de precisión con que debamos evaluar esos flujos caloríficos y así el número de nodos necesarios en cada uno de esos elementos.

Para dar respuesta a esta posibilidad y al mismo tiempo poder evaluar de una forma precisa su importancia, se planteó la necesidad de realizar un segundo conjunto de experimentos numéricos que consideraran, ahora, los elementos integrados dentro de su conjunto arquitectónico.

#### 4.2.2 Análisis de la influencia de la subdivisión nodal en distintos elementos arquitectónicos integrados en su conjunto

Igual que en los análisis realizados en el apartado anterior, los experimentos numéricos aquí realizados, se diseñaron, también, teniendo en cuenta las características arquitectónicas de los edificios que posteriormente analizaremos. Dos fueron los experimentos planteados, cada uno de ellos correspondiendo a situaciones que incluyeran la mayor parte de las interrelaciones existentes entre los distintos componentes seleccionados y sometidos a condiciones ambientales diferenciadas, en un caso correspondiendo a las condiciones imperantes en una habitación sur y en el otro, a una habitación norte.

##### 4.2.2.1 Experimento numérico en una habitación orientada al sur.

El primero de los experimentos planteados perseguía determinar, bajo condiciones reales, la influencia que sobre la temperatura del aire de una habitación orientada al sur, tiene el grado de descomposición nodal de los distintos elementos que la delimitan. Se seleccionó para ello, una habitación cuya fachada sur incorporara un muro Trombe. En la Fig.4.6 puede verse un detalle de la geometría considerada, así como de la subdivisión nodal realizada. Para fijar esta descomposición nodal se partió de los resultados obtenidos en los experimentos numéricos realizados en la sección anterior, tomando como criterio aquel que establece que el número mínimo de nodos a emplear en la descomposición de un componente, sea el que produce un error máximo, en la determinación del flujo calorífico, del orden del 10% del tomado como valor de referencia. Así el número de nodos empleado para descomponer el muro de hormigón fue de 5, que conduce, según el resultado de la Tabla 4.1, a un error en la evaluación del flujo calorífico del orden del 4% respecto a la descomposición en 20 nodos, usada como referencia; eligiéndose en este caso un orden de error más pequeño a causa de la importancia que desde el punto de vista térmico tiene este elemento. El número de nodos elegido para la descomposición del tabique de separación con la habitación norte fue de 3, al que corresponde un error, según la Tabla 4.3, del orden del 5%. Y así con el resto de elementos.

En cuanto a las condiciones térmicas de frontera elegidas, fueron las siguientes: el muro Trombe se consideró sometido a condiciones de ambiente exterior, tomándose los datos de radiación solar y temperatura del aire correspondientes al mismo periodo de invierno considerado en la sección anterior. La habitación contigua por la cara norte, se consideró sometida a una temperatura constante de 10 °C, mientras que la habitación superior se la consideró sometida a una temperatura, también constante, de 15 °C. Las paredes medianeras se consideraron, para simplificar, como adiabáticas. Todas estas condiciones se tomaron así, porque son de forma aproximada las reinantes en la casa nº 15 del campo bioclimático de Begues, cuando se considera sometida a condiciones de fluctuación libre, sin empleo de energía auxiliar, y que, por tanto, son las que encontraremos cuando realicemos la contrastación experimental.



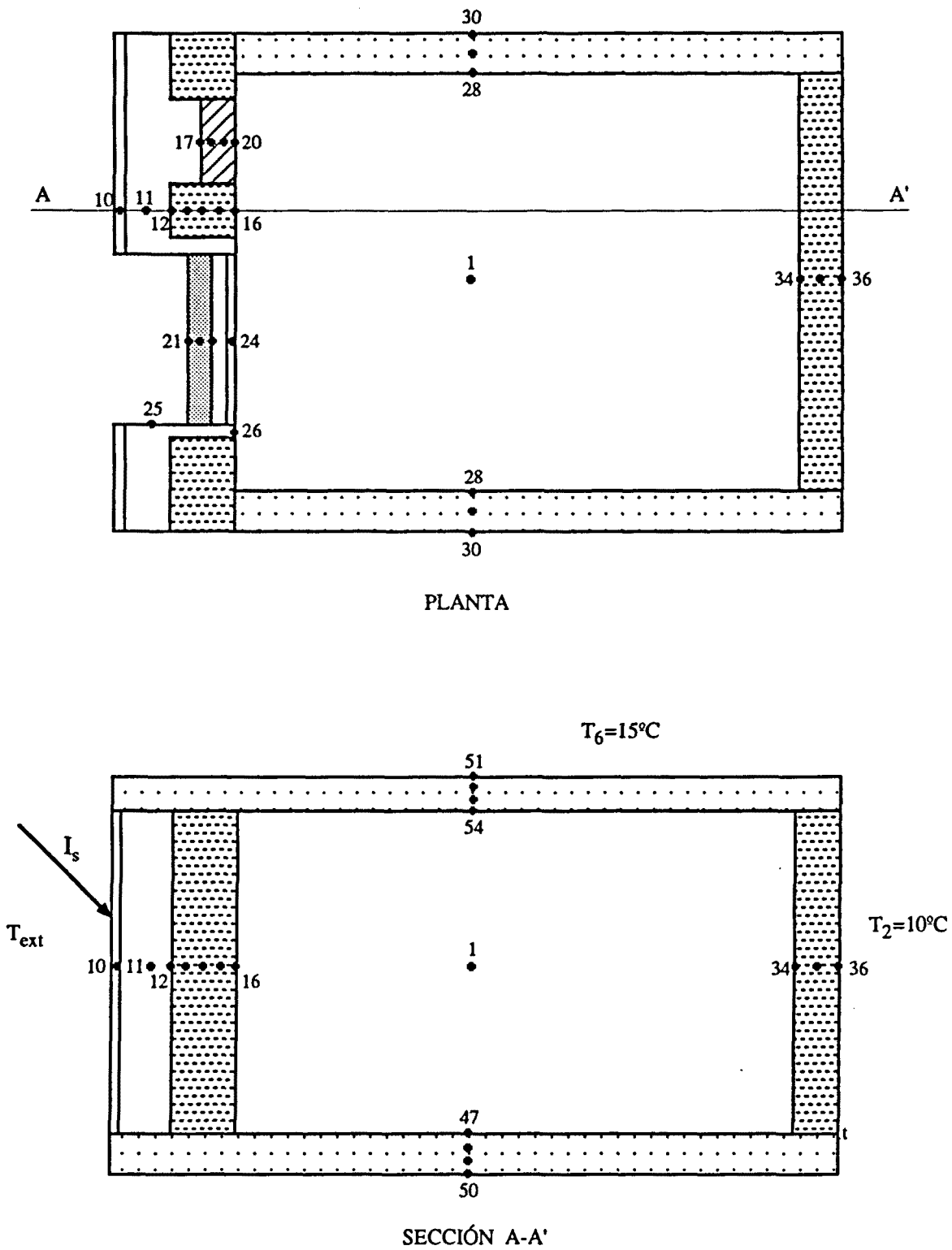


Fig.4.6: Esquema de la descomposición nodal tomada como referencia, en el experimento de una habitación con muro Trombe.

**Tabla 4.6:** Descripción de los cerramientos de la habitación sur de la Fig.4.6, en el caso de referencia, EXP-A0.

Cerramiento	Composición	Nº nodo	Area (m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Capacidad calorífica (kJ/°C)
Aire hab.	Aire	1	81.6 m <sup>3</sup>		108
Muro Trombe	Vidrio	10	11.3	0.01	237.3
	Camara de aire	11	13.1	0.18	2.8
	Muro hormigón	12+16	8.7	0.20	4510.
	Puerta madera	17+20	2.1	0.06	201.
	Plancha aluminio ext.	25	3	0.002	14.6
	Plancha aluminio int.	26	1.8	0.002	8.7
	Ventana sobre puerta	27	0.5	0.006	6.3
Ventana	Persiana PVC	21+23	4.5	0.01	36.40
	Vidrio	24	4.5	0.003	28.35
Tabique norte	Ladrillo hueco	34+36	13.8	0.12	1788
Paredes medianeras	Hormigón	28+30	30.8	0.10	7984
Suelo	Pavimento + capa comp.	47+48	29.7	0.08	6158
	Bovedillas	49+50	29.7	0.20	1447
Techo	Pavimento + capa comp.	51+52	29.7	0.05	3849
	Bovedillas	53+54	29.7	0.20	1447

Por lo que hace referencia a la composición y propiedades físicas de los distintos cerramientos en el caso de referencia, se encuentran definidas en la Tabla 4.6. Por lo que hace referencia a la definición de los distintos tipos de enlaces existentes entre los nodos y otros detalles, puede consultarse el listado del fichero de configuración correspondiente que figura en el Apéndice B. Mientras que en la Tabla 4.7 se presentan resumidos los resultados obtenidos para los distintos casos considerados, que son los siguientes:

**EXP-A0:** Corresponde al caso tomado como referencia, su descomposición nodal es la expuesta en la Fig.4.6. El resultado obtenido en este caso es el correspondiente a la primera fila de la Tabla 4.7.

**EXP-A1:** Es idéntico al anterior excepto que se ha variado el número de nodos empleados en la descomposición del tabique de separación entre la habitación del Trombe y la norte. Como puede apreciarse en la Tabla 4.7, el error cometido en la determinación de la temperatura media del aire de la habitación del muro Trombe  $T_1$ , cuando se emplea un sólo nodo, es de 0.8 °C, mientras que el cometido en el flujo calorífico transmitido a través del tabique es del 45%. Afortunadamente, puede observarse como el error disminuye mucho cuando se emplean dos nodos en la descomposición. Este sería, pues, el número mínimo de nodos a utilizar para modelizar un tabique en las condiciones aquí descritas.

- EXP-A2:** Es idéntico al caso EXP-A0 pero variando ahora el número de nodos en el techo de la habitación. En este caso, puede verse en la Tabla 4.7, como el error cometido en  $T_1$ , cuando se toma un sólo nodo, es de  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras el error cometido en el flujo calorífico es del 26%. Al igual que en el caso anterior, el error es prácticamente despreciable cuando se emplean dos nodos. Podría establecerse para esta situación, pues, que el número de nodos necesarios para la descomposición sería de 1 ó 2, tomando, preferentemente, este último valor.
- EXP-A3:** Es idéntico al caso de referencia pero variando aquí el número de nodos en el suelo de la habitación. Puede verse como el error cometido cuando utilizamos un sólo nodo para la descomposición, ya conduce a un resultado aceptable comparado con el obtenido con el modelo de referencia que emplea cuatro. Sería, pues, este el valor a utilizar.
- EXP-A4:** Es idéntico al caso EXP-A0 pero variando el número de nodos en los muros laterales de la habitación. Al igual que en el caso anterior, puede verse como el error cometido con el empleo de un sólo nodo, ya conduce a un buen resultado.
- EXP-A5:** Es idéntico al caso EXP-A0 pero variando ahora el número de nodos en el muro de hormigón del Trombe. En este caso, el error cometido con el empleo de un sólo nodo es muy grande, de  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la temperatura media del aire de la habitación y del 38% para el flujo calorífico. Cuando destinamos tres nodos el error se reduce considerablemente, y sería un resultado aceptable si no fuera porque el error cometido en la determinación de la temperatura máxima del aire del Trombe es de  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Comparando el resultado obtenido con una descomposición en siete nodos, con relación al obtenido en el modelo de referencia, donde se emplean cinco, observamos que el resultado ya es prácticamente coincidente. Por tanto, el número mínimo de nodos necesarios a emplear en este caso debería ser de 4 ó 5.
- EXP-A6:** Es idéntico al caso EXP-A0 pero variando ahora el número de nodos en la puerta de madera existente en el muro de hormigón del Trombe. En este caso, puede observarse como el empleo de un sólo nodo conduce a un resultado medianamente aceptable en la temperatura de la habitación, sin embargo, en la temperatura máxima del aire del Trombe, se presentan diferencias de  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y errores del 500% en el flujo calorífico transmitido a través de la puerta. El empleo de dos nodos solventa ya estas desviaciones.
- EXP-A7:** Es idéntico al caso de referencia pero variando el número de nodos empleados en la descomposición de la ventana, en donde se ha considerado la presencia de una persiana. En el modelo de referencia se han utilizado tres nodos para la persiana y uno para el vidrio de la ventana. En la Tabla 4.7 puede apreciarse como una descomposición en base a utilizar un sólo nodo en la persiana y otro en el vidrio comporta resultados bastante aceptables.

Tabla 4.7: Resultados obtenidos en los distintos experimentos numéricos realizados sobre la habitación con muro Trombe de la Fig.4.6, en el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

	Nº	Tlmed	Tlmax	Tlmin	Tl1med	Tl1max	Tl1min	Q16-1 + -	Q20-1 + -	Q24-1 + -	Q26-1 + -	Q27-1 + -	Q28-1 + -	Q34-1 + -	Q47-1 + -	Q54-1 + -
EXP-A0	-	17.5	19.4	15.2	17.7	42.1	8.2	77.35 0	4.37 1.43	- 17.95	3.29 8.05	2.13 2.62	6.48 13.01	0 30.14	3.35 3.96	0.12 19.98
EXP-A1	1	16.7	18.6	14.5	17.4	41.8	7.9	82.17 0	4.61 1.22	- 16.81	3.57 7.25	2.24 2.37	6.65 12.46	0 43.91	3.86 3.60	0.29 15.83
	2	17.5	19.4	15.2	17.7	42.1	8.2	77.37 0	4.37 1.43	- 17.95	3.29 8.05	2.13 2.62	6.45 12.98	0 30.16	3.34 3.95	0.12 19.97
EXP-A2	1	17.1	18.8	15	17.5	41.9	8.1	79.70 0	4.52 1.38	- 17.49	3.43 7.68	2.19 2.51	5.59 11.94	0 28.47	2.80 3.69	0.22 25.31
	2	17.5	19.4	15.2	17.7	42.1	8.2	77.39 0	4.37 1.43	- 17.95	3.29 8.05	2.13 2.62	6.43 12.92	0 30.12	3.34 3.94	0.14 20.09
EXP-A3	1	17.5	19.4	15.2	17.7	42	8.2	77.37 0	4.36 1.42	- 17.95	3.29 8.06	2.13 2.62	6.35 12.89	0 30.16	3.59 4.11	0.12 20.02
EXP-A4	1	17.5	19.4	15.2	17.7	42.1	8.2	77.41 0	4.38 1.43	- 17.94	3.29 8.05	2.13 2.62	6.92 13.61	0 30.10	3.20 3.86	0.12 19.87
EXP-A5	1	18.3	21.6	15.5	17	33	9.3	106.8 0	2.49 1.25	- 19.82	0.66 8.45	1.19 2.66	9.90 21.46	0 36.08	5.10 6.68	0.11 29.85
	3	17.5	19.4	15.2	17.8	38.7	8.3	77.33 0	4.12 1.28	- 18.01	2.40 7.38	1.84 2.38	6.34 12.51	0 30.19	3.29 3.84	0.12 19.94
	7	17.5	19.3	15.2	17.7	42.1	8.2	77.18 0	4.42 1.46	- 17.94	3.35 8.07	2.15 2.63	6.10 12.65	0 30.06	3.10 3.86	0.12 19.78
EXP-A6	1	17.7	20.2	15.2	17.5	39.9	8.7	77.35 0	21.7 6.56	- 18.37	2.28 8.02	1.79 2.59	8.04 16.01	0 31.96	4.22 4.83	0.16 23.31
	2	17.5	19.4	15.2	17.7	42.1	8.2	77.38 0	4.94 1.80	- 17.93	3.22 8.01	2.11 2.60	6.50 13.09	0 30.17	3.35 3.97	0.12 20.05
EXP-A7	1-1	17.4	19.3	15.1	17.6	42	8.2	78.05 0	4.39 1.37	- 20.59	3.31 7.91	2.14 2.58	6.68 12.96	0 29.59	3.50 3.92	0.15 19.37

La segunda columna, encabezada por Nº, indica el número de nodos empleados para modelizar el elemento analizado en cada experimento, excepto en el caso de referencia, EXP-A0, cuya descomposición nodal puede verse en la Fig.4.6. Para el significado de los otros términos consultar también esta figura. Los signos + y - indican si el flujo calorífico entre o sale de la habitación. Los flujos caloríficos vienen en MJ y las temperaturas en ºC.

4.2.2.2 Experimento numérico en una habitación orientada al norte.

Con el segundo de los experimentos numéricos realizados pretendíamos determinar la influencia que, sobre la temperatura del aire de una habitación orientada al norte, tiene el grado de descomposición nodal de los distintos elementos que la delimitan. En la Fig.4.7 se presenta un detalle de su geometría, así como de la descomposición nodal realizada en el caso que nos servirá de referencia. Esta descomposición nodal se eligió, al igual que en el experimento anterior, en base a los criterios obtenidos en los experimentos numéricos realizados en la Sección 4.1.1.

En cuanto a las condiciones térmicas de frontera elegidas, en este caso, fueron las siguientes: la habitación contigua por su parte sur, se consideró sometida a una temperatura constante de 17 °C, mientras que la habitación contigua por su parte superior se consideró a una temperatura, también constante, de 12 °C. El muro norte, por su parte exterior, se consideró sometido a condiciones ambientales de invierno (las mismas que en el experimento anterior). Las paredes medianeras se consideraron, para simplificar, como adiabáticas. Al igual que en el experimento anterior estas condiciones se eligieron así, porque de forma aproximada son las imperantes en la casa nº 15 en régimen de fluctuación libre.

Tabla 4.8: Descripción de los cerramientos de la habitación sur de la Fig.4.7, en el caso de referencia, EXP-B0.

Cerramiento	Composición	Nº nodo	Area (m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Capacidad calorífica (kJ/°C)
Aire hab.	Aire	2	38.6 m <sup>3</sup>		46.8
Tabique	Ladrillo hueco	34+36	13.8	0.12	1788
Pared norte	Ladrillo perforado	43+44	11.8	0.15	2549
	Poliestireno expandido	45	11.8	0.05	12.4
	Ladrillo macizo	46	11.8	0.10	1699
Ventana	Vidrio	63	2	0.003	12.6
Paredes medianeras	Hormigón	40+42	14.6	0.10	3784
Suelo	Pavimento + capa comp.	55+56	14.8	0.08	3069
	Bovedillas	57+58	14.8	0.20	721
Techo	Pavimento + capa comp.	59+60	14.8	0.05	1917
	Bovedillas	61+62	14.8	0.20	720

La composición y propiedades físicas de los distintos cerramientos en el caso de referencia, se encuentran definidos en la Tabla 4.8. Por lo que hace referencia a la definición de los distintos tipos de enlaces existentes entre los nodos y otros detalles, puede consultarse el listado del fichero de configuración correspondiente que figura en el Apéndice B. Mientras que en la Tabla 4.9 aparecen los resultados obtenidos para los distintos casos considerados, que son los siguientes:

EXP-B0: Corresponde al caso tomado como referencia, su descomposición nodal es la expuesta en la Fig.4.7. El resultado obtenido en este caso aparece en la primera fila de la Tabla 4.9.

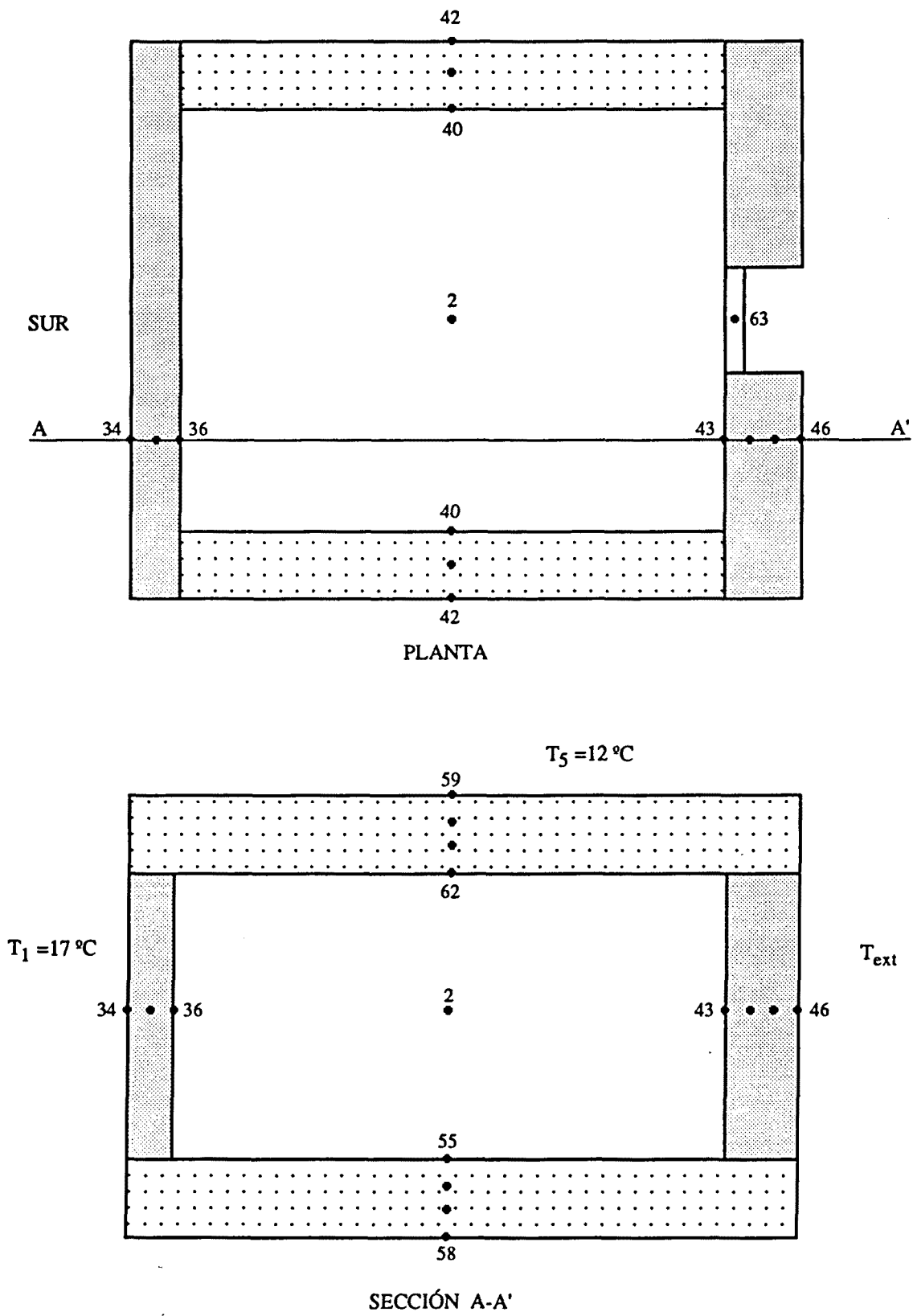


Fig.4.7: Esquema de la descomposición nodal tomada como referencia, en el experimento de una habitación orientada al norte.

- EXP-B1: Es igual al caso anterior, pero variando el número de nodos utilizados para descomponer el tabique de separación con la habitación sur. Del resultado de la Tabla 4.9, se desprende, tal como encontramos en el experimento EXP-A1, que el número mínimo de nodos a emplear en esta situación debe ser de dos, puesto que la descomposición en un sólo nodo comporta errores importantes (más de 1 °C en la temperatura del aire de la habitación).
- EXP-B2: Es idéntico al caso EXP-B0, pero variando ahora el número de nodos utilizados para descomponer el muro norte. Al igual que antes, puede verse como el número mínimo de nodos necesarios para esta descomposición es de dos.
- EXP-B3: Es idéntico al caso de referencia, pero variando ahora el número de nodos utilizados para descomponer el muro lateral. En este caso, puede observarse como la descomposición en un sólo nodo, ya conduce a resultados aceptables.
- EXP-B4: También es idéntico al caso EXP-B0, pero variando ahora el número de nodos utilizados para descomponer el forjado del pavimento en contacto con el terreno. En este caso también es suficiente la descomposición en un sólo nodo.
- EXP-B5: Es idéntico al caso EXP-B0, pero variando ahora el número de nodos utilizados para descomponer el forjado del techo. Se desprende de los resultados presentados, como en este caso también es suficiente la descomposición en un sólo nodo.

Tabla 4.9: Resultados obtenidos en los distintos experimentos numéricos realizados sobre la habitación norte de la Fig.4.7, en el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

	Nº	T <sub>2med</sub> T <sub>2max</sub> T <sub>2min</sub>			Q <sub>36-2</sub>		Q <sub>43-2</sub>		Q <sub>40-2</sub>		Q <sub>55-2</sub>		Q <sub>62-2</sub>		Q <sub>63-2</sub>	
					+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
EXP-B0	-	9.46	9.94	8.75	24.66	0	0	5.10	0.31	0.95	0	4.02	0.44	0.02	0	15.3
EXP-B1	1	10.6	11.1	9.93	33.53	0	0	7.14	0.11	1.39	0	5.83	0.03	0.79	0	18.5
	2	9.46	9.94	8.76	24.65	0	0	5.10	0.30	0.94	0	4.02	0.44	0.02	0	15.3
EXP-B2	1	6.52	7.86	4.84	44.56	0	0	43.1	3.98	2.59	1.97	1.17	3.39	0.01	0	7.10
	2	9.48	10	8.74	24.56	0	0	4.93	0.41	1.06	0	4.03	0.46	0.05	0	15.4
EXP-B3	1	9.46	9.94	8.75	24.66	0	0	5.11	0.33	0.97	0	4.02	0.44	0.02	0	15.3
EXP-B4	1	9.45	9.96	8.70	24.69	0	0	5.13	0.33	0.98	0	4.04	0.44	0.02	0	15.3
EXP-B5	1	9.52	9.99	8.83	24.46	0	0	5.05	0.32	0.88	0	4.03	0.66	0.02	0	15.5

La segunda columna, encabezada por Nº, indica el número de nodos empleados para modelizar el elemento analizado en cada experimento, excepto en el caso de referencia, EXP-B0, cuya descomposición nodal puede verse en la Fig.4.7. Para el significado de los otros términos consultar también esta figura. Los signos + y - indican si el flujo calorífico entre o sale de la habitación. Los flujos caloríficos vienen en MJ y las temperaturas en °C.

#### 4.2.2.3 Conclusiones sobre los experimentos numéricos realizados.

Comparando los resultados obtenidos en estos dos experimentos, puede comprobarse como en el caso de la habitación norte el número de nodos necesarios para la descomposición nodal es mucho menor que para la habitación sur. Ello es debido al hecho de que en ésta las solicitaciones térmicas son mucho mayores y sometidas a mayor fluctuación a lo largo del tiempo.

De los resultados obtenidos con este segundo grupo de experimentos numéricos, en los que se ha considerado la influencia mútua entre los diferentes cerramientos de una misma habitación, puede verse como el número de nodos necesarios para la modelización de los distintos elementos ha disminuido de forma apreciable con relación a los que necesitábamos cuando estos elementos se consideraban por separado. Este resultado se justifica fácilmente, si tenemos en cuenta los diferentes pesos relativos con que cada uno de los elementos considerados interviene en el establecimiento de las condiciones térmicas finales de un local determinado. Ello, evidentemente, supone una gran ventaja, ya que nos permite reducir de forma considerable, el número total de nodos necesarios para la modelización térmica de un edificio, al mismo tiempo que nos simplifica la construcción de ese modelo y el tiempo de cálculo necesario para la simulación.

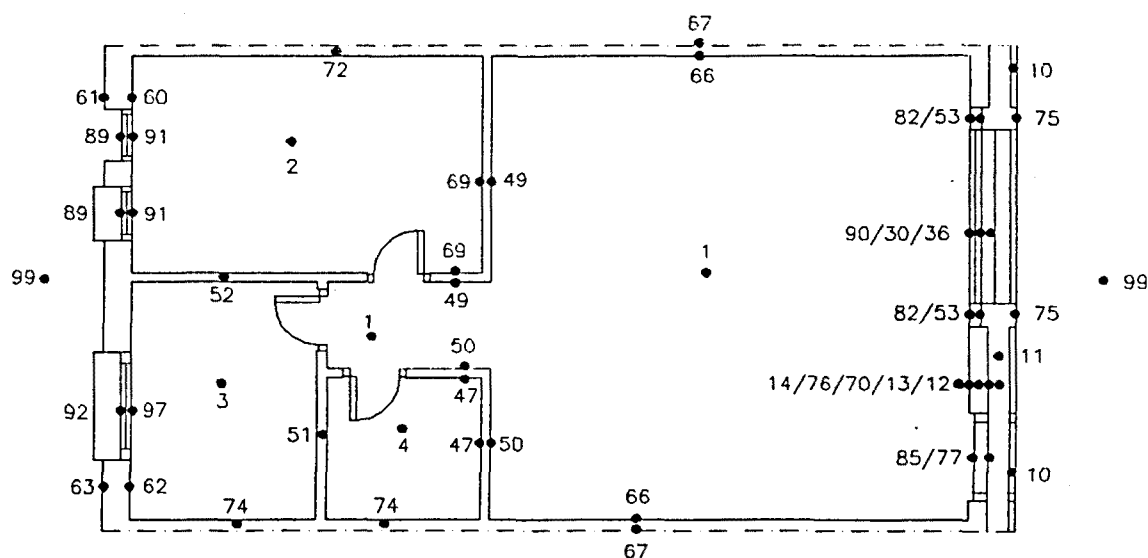


### 4.3 Construcción del modelo térmico de la casa nº 15 de Begues.

#### 4.3.1 Descomposición nodal.

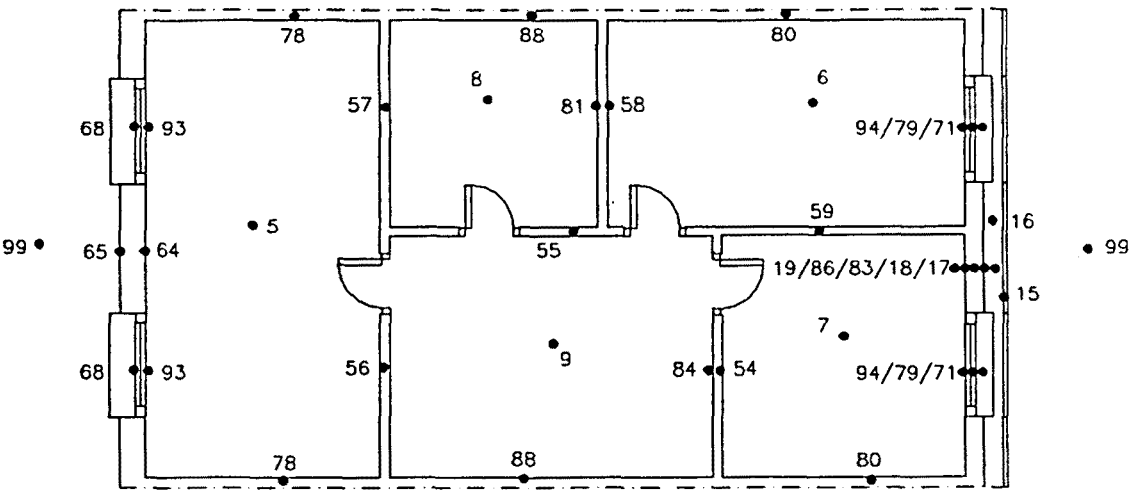
Los resultados obtenidos en los experimentos numéricos anteriores nos permiten, en este momento, abordar, con mayor garantía, la tarea de construir un modelo de las transferencias energéticas habidas en un edificio, ya que de ellos pueden inferirse una serie de criterios, útiles a la hora de plantearnos su descomposición nodal.

Como ya se comentó anteriormente, el edificio que pretendemos modelizar aquí es el de la casa nº 15 del conjunto bioclimático de Begues, que corresponde a la tipología de muro Trombe. En los planos de la Fig.4.8 puede verse su distribución interior, junto a la descomposición nodal realizada, teniendo en cuenta los criterios obtenidos en el apartado anterior, mientras que en la Tabla 4.10 se describen las características físicas y térmicas de cada uno de los nodos definidos. A fin de poder evaluar, posteriormente, el calor intercambiado entre el edificio y su medio exterior, se ha tenido que subdividir todos los elementos frontera en un mínimo de dos nodos, aunque ello no fuera necesario desde el punto de vista de precisión en el cálculo. La razón es que de esta forma, se puede fácilmente evaluar el calor transferido por conducción entre esos nodos, lo cual simplifica la determinación de las pérdidas del edificio. Es éste el motivo de que la mayoría de los cristales de las ventanas se hayan subdividido en dos nodos. Como puede verse, para la confección del modelo se ha utilizado la práctica totalidad de los 99 nodos disponibles en el código PASSIM.

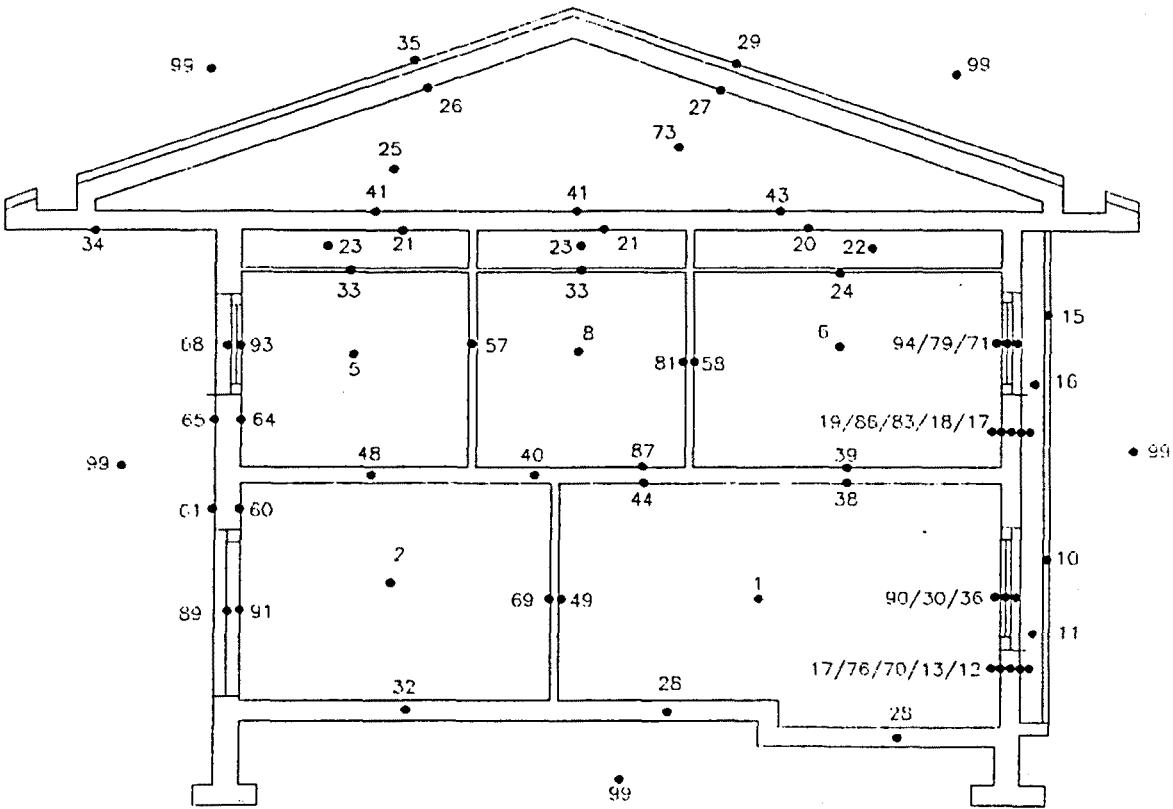


PLANTA BAJA.

Fig.4.8: Distribución interior y detalle de la descomposición nodal realizada en la casa nº 15.



PLANTA PISO.



SECCIÓN TRANSVERSAL.

Fig.4.8 (Cont.): Distribución interior y detalle de la descomposición nodal realizada en la casa nº 15.

Tabla 4.10: Descripción de los nodos correspondientes a la descomposición nodal presentada en la Fig.4.8.

Nº	Tipo	Descripción	Material	Área/Vol. (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	c <sub>p</sub> (J/kg °C)	Cap.cal. (kJ/°C)
1	NF	Aire sala central, P.B.	Aire+madera	- / 86.9	-	1.2 / 800	1000/2800	116.5
2	NF	Aire cocina, P.B.	Aire+madera	- / 24.0	-	1.2 / 800	1000/2800	32.2
3	NF	Aire habitación N., P.B.	Aire	- / 15.3	-	1.2	1000	18.4
4	NF	Aire cuarto baño, P.B.	Aire	- / 6.65	-	1.2	1000	8
5	NF	Aire habitación N, 1 P.	Aire+madera	- / 34.9	-	1.2 / 800	1000/2800	46.8
6	NF	Aire habitación S.E., 1 P.	Aire	- / 24.4	-	1.2	1000	29.3
7	NF	Aire habitación S.O., 1 P.	Aire	- / 18.4	-	1.2	1000	22
8	NF	Aire cuarto baño, 1 P.	Aire	- / 15.3	-	1.2	1000	18.4
9	NF	Aire escalera, 1 P.	Aire	- / 22.8	-	1.2	1000	27.4
10	NF	Vidrio Trombe, P.B.	Vidrio	11.3 / -	0.01	2500	830	234.5
11	NF	Aire Trombe, P.B.	Aire	- / 2.35	-	1.2	1000	2.9
12	NF	Muro Trombe ext., P.B.	Hormigón	8.7 / -	0.025	2400	840	438.5
13	NF	Muro Trombe medio, P.B.	Hormigón	8.7 / -	0.050	2400	840	877
14	NF	Muro Trombe int., P.B.	Hormigón	8.7 / -	0.025	2400	840	877
15	NF	Vidrio Trombe, 1 P.	Vidrio	16.5 / -	0.01	2500	830	342
16	NF	Aire Trombe, 1 P.	Aire	- / 3	-	1.2	1000	3.6
17	NF	Muro Trombe ext., 1 P.	Hormigón	13.6 / -	0.025	2400	840	685.5
18	NF	Muro Trombe medio, 1 P.	Hormigón	13.6 / -	0.050	2400	840	1371
19	NF	Muro Trombe int., 1 P.	Hormigón	13.6 / -	0.025	2400	840	685.5
20	NF	Forjado sobre H6+H7 (inf)	Bovedilla	18.5 / -	0.18	290	840	811.2
21	NF	Forj. s/ H5+H8+H9 (inf)	Bovedilla	31.8 / -	0.18	290	840	1394.4
22	NF	Aire falso techo, sur.	Aire	- / 8.3	-	1.2	1000	10
23	NF	Aire falso techo, norte.	Aire	- / 14.3	-	1.2	1000	17.2
24	NF	Techo H6+H7	Yeso	18.5 / -	0.025	800	1000	370
25	NF	Cámara aire tejado norte	Aire+ladrillo	- / 30.2	-	1.2/1200	1000/900	73.2
26	NF	Tejado norte (inf)	Hormigón	31.8 / -	0.04	2400	1080	2565
27	NF	Tejado sur (inf)	Hormigón	31.8 / -	0.04	2400	1080	2565
28	NF	Suelo H1	Forjado	31.6 / -	0.28	900	840	6636
29	NF	Tejado sur (sup)	Hormigón	31.8 / -	0.04	2400	1080	2565
30	NF	Cristal ventana H1 (ext)	Vidrio	4.5 / -	0.0015	2500	830	18.7
31	NF	Suelo H3+H4	Forjado	8.4 / -	0.28	900	840	1764
32	NF	Suelo H2	Forjado	9.3 / -	0.28	900	840	1953
33	NF	Techo H5+H8+H9	Yeso	31.8 / -	0.025	800	1000	636
34	NF	Voladizo norte (inf)	Bovedilla	9 / -	0.18	290	840	394.6
35	NF	Tejado norte (sup)	Hormigón	31.8 / -	0.04	2400	1080	2565
36	NF	Persiana ventana H1	PVC	4.5 / -	0.01	900	900	36.4
38	NF	Techo H1 (inf)	Bovedilla	18.2 / -	0.20	290	840	886.7

Tabla 4.10 (Cont.): Descripción de los nodos correspondientes a la descomposición nodal presentada en la Fig.4.8.

Nº	Tipo	Descripción	Material	Área/Vol. (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	c <sub>p</sub> (J/kg °C)	Cap.cal. (kJ/°C)
39	NF	Techo H1 (sup)	Pavimento	18.2 / -	0.08	2400	840	2935.3
40	NF	Techo entre H2 y H8	Forjado	2.2 / -	0.28	900	840	462
41	NF	Forj. s/H5+H8+H9+volad	Capa comp.	40.8 / -	0.04	2400	840	3290
42	NF	Techo entre H4 y H9	Forjado	2.4 / -	0.28	900	840	504
43	NF	Forjado sobre H6+H7 (inf)	Capa comp.	18.5 / -	0.04	2400	840	1491.8
44	NF	Techo entre H1 y H8 (inf)	Bovedilla	4.3 / -	0.20	290	840	209
46	NF	Techo entre H3+H4 y H5	Forjado	5.9 / -	0.28	900	840	1239
47	NF	Tabique entre H1 y H4	Lad. hueco	8.3 / -	0.06	1200	900	538
48	NF	Techo entre H2 y H5	Forjado	7 / -	0.28	900	840	1470
49	NF	Tabique entre H1 y H2	Lad. hueco	10.4 / -	0.06	1200	900	687
50	NF	Tabique entre H1 y H4	Lad. hueco	8.3 / -	0.06	1200	900	538
51	NF	Tabique entre H1+H4 y H3	Lad. hueco	7.3 / -	0.12	1200	900	946
52	NF	Tabique entre H2 y H3	Lad. hueco	5.4 / -	0.12	1200	900	700
53	NF	Marco ventana H1 (ext)	Aluminio	1.8 / -	0.001	2700	900	4.4
54	NF	Tabique entre H7 y H9	Lad. hueco	6.3 / -	0.06	1200	900	408
55	NF	Tabique entre H8 y H9	Lad. hueco	5.9 / -	0.12	1200	900	765
56	NF	Tabique entre H5 y H9	Lad. hueco	6.3 / -	0.12	1200	900	816
57	NF	Tabique entre H5 y H8	Lad. hueco	6.1 / -	0.12	1200	900	790
58	NF	Tabique entre H6 y H8	Lad. hueco	6.1 / -	0.06	1200	900	395
59	NF	Tabique entre H6 y H7+H9	Lad. hueco	9.4 / -	0.12	1200	900	1218
60	NF	Muro norte H2 (int)	EPS+lad.perf	5.2 / -	0.15	20/1600	1400/900	756.1
61	NF	Muro norte H2 (ext)	Lad.perforado	5.2 / -	0.15	1600	900	1123.2
62	NF	Muro norte H3 (int)	EPS+lad.perf	7 / -	0.15	20/1600	1400/900	1017.8
63	NF	Muro norte H3 (ext)	Lad.perforado	7 / -	0.15	1600	900	1512
64	NF	Muro norte H5 (int)	EPS+lad.perf	13.7 / -	0.15	20/1600	1400/900	1992
65	NF	Muro norte H5 (ext)	Lad.perforado	13.7 / -	0.15	1600	900	2959
66	NF	Pared medianera H1	Hormigón	30.8 / -	0.10	2400	840	12418
67	NA	Temp. pared medianera	-	- / -	-	-	-	-
68	NF	Postigo exterior H5	Madera	2.8 / -	0.02	570	2800	89.4
69	NF	Tabique entre H1 y H2	Lad. hueco	10.4 / -	0.06	1200	900	687
70	NF	Muro Trombe medio, P.B.	Hormigón	8.7 / -	0.050	2400	840	877
71	NF	Cristal ventana H6+H7 (ext)	Vidrio	2.6 / -	0.003	2500	830	16.18
72	NF	Pared medianera H2	Hormigón	9.6 / -	0.10	2400	840	1935
73	NF	Cámara aire tejado norte	Aire+ladrillo	- / 30.2	-	1.2/1200	1000/900	73.2
74	NF	Pared medianera H3+H4	Hormigón	5.4 / -	0.10	2400	840	1935
75	NF	Marco ventana Trombe	Aluminio	3.5 / -	0.002	2700	900	17
76	NF	Muro Trombe medio, P.B.	Hormigón	8.7 / -	0.050	2400	840	877

Tabla 4.10 (Cont.): Descripción de los nodos correspondientes a la descomposición nodal presentada en la Fig.4.8.

Nº	Tipo	Descripción	Material	Área/Vol. (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	c <sub>p</sub> (J/kg °C)	Cap.cal. (kJ/°C)
77	NF	Puerta entrada (ext)	Madera	2.1 / -	0.03	570	2800	100
78	NF	Pared medianera H5	Hormigón	13.1 / -	0.10	2400	840	3161
79	NF	Cristal ventana H6+H7 (int)	Vidrio	2.6 / -	0.003	2500	830	16.18
80	NF	Pared medianera H6+H7	Hormigón	16.2 / -	0.10	2400	840	3266
81	NF	Tabique entre H6 y H8	Lad. hueco	6.1 / -	0.06	1200	900	395
82	NF	Marco ventana H1 (int)	Aluminio	1.8 / -	0.001	2700	900	4.4
83	NF	Muro Trombe medio, 1 P.	Hormigón	13.6 / -	0.050	2400	840	1371
84	NF	Tabique entre H7 y H9	Lad. hueco	6.3 / -	0.06	1200	900	408
85	NF	Puerta entrada (int)	Madera	2.1 / -	0.03	570	2800	100
86	NF	Muro Trombe medio, 1 P.	Hormigón	13.6 / -	0.050	2400	840	1371
87	NF	Techo entre H1 y H8 (sup)	Pavimento		0.08	2400	840	693
88	NF	Pared medianera H8+H9	Hormigón	14.4 / -	0.10	2400	840	3443
89	NF	Cristal puerta H2 (ext)	Vidrio	1.8 / -	0.003	2500	830	11.2
90	NF	Cristal ventana H1 (int)	Vidrio	4.5 / -	0.0015	2500	830	18.7
91	NF	Cristal puerta H2 (int)	Vidrio	1.8 / -	0.003	2500	830	11.2
92	NF	Postigo interior H3	Madera	1.4 / -	0.02	570	2800	44.7
93	NF	Port.int.+ doble vidrio H5	Madera+vidrio	2.8 / -	0.02/0.012	570/2500	2800/840	159.1
94	NF	Postigo int. H6 y H7	Madera+EPS	2.6 / -	0.01+0.01	570/20	2800/1400	25.6
96	NF	Ventana puerta entrada	Vidrio	0.5 / -	0.006	2500	830	6
97	NF	Cristal ventana H3	Vidrio	1.4 / -	0.012	2500	830	34.8
98	NA	Temperatura de cielo	-	-	-	-	-	-
99	NA	Temperatura aire exterior	-	-	-	-	-	-

Notas: NF, nodo flotante; NA, nodo asignado; P.B., planta baja; 1 P., planta piso; H, habitación.

4.3.2 Definición de enlaces conductivos.

En la Fig.4.9 se muestran todos los intercambios de tipo conductivo y convectivo definidos entre los distintos nodos. Como ya hemos dicho, los del tipo conductivo permiten tratar dos tipos distintos de conexiones: la transmisión de calor por conducción unidimensional (Ec.3.2) y las infiltraciones (Ec.3.3). En la Tabla 4.11 se muestra su cálculo. En algunos casos, para poder determinar su valor, ha sido necesario recurrir a un proceso iterativo basado en el mismo proceso de simulación; motivado, ya sea por falta de expresiones analíticas adecuadas para su cálculo, ya porque el valor encontrado no comportaba un ajuste entre los resultados de la simulación y los del seguimiento. En este sentido, hay que señalar el caso del puente térmico existente en la fachada sur (como consecuencia del voladizo), donde ha sido a partir de la simulación que se han encontrado los valores de los enlaces definidos y que no eran correctamente predichos por la expresión de flujo unidimensional, debido seguramente a la naturaleza bidimensional de un enlace de este tipo. Efectivamente, el valor del enlace entre los nodos 20-43 no concuerda con el resultado estimado mediante la Ec.3.2, además ha sido nece-

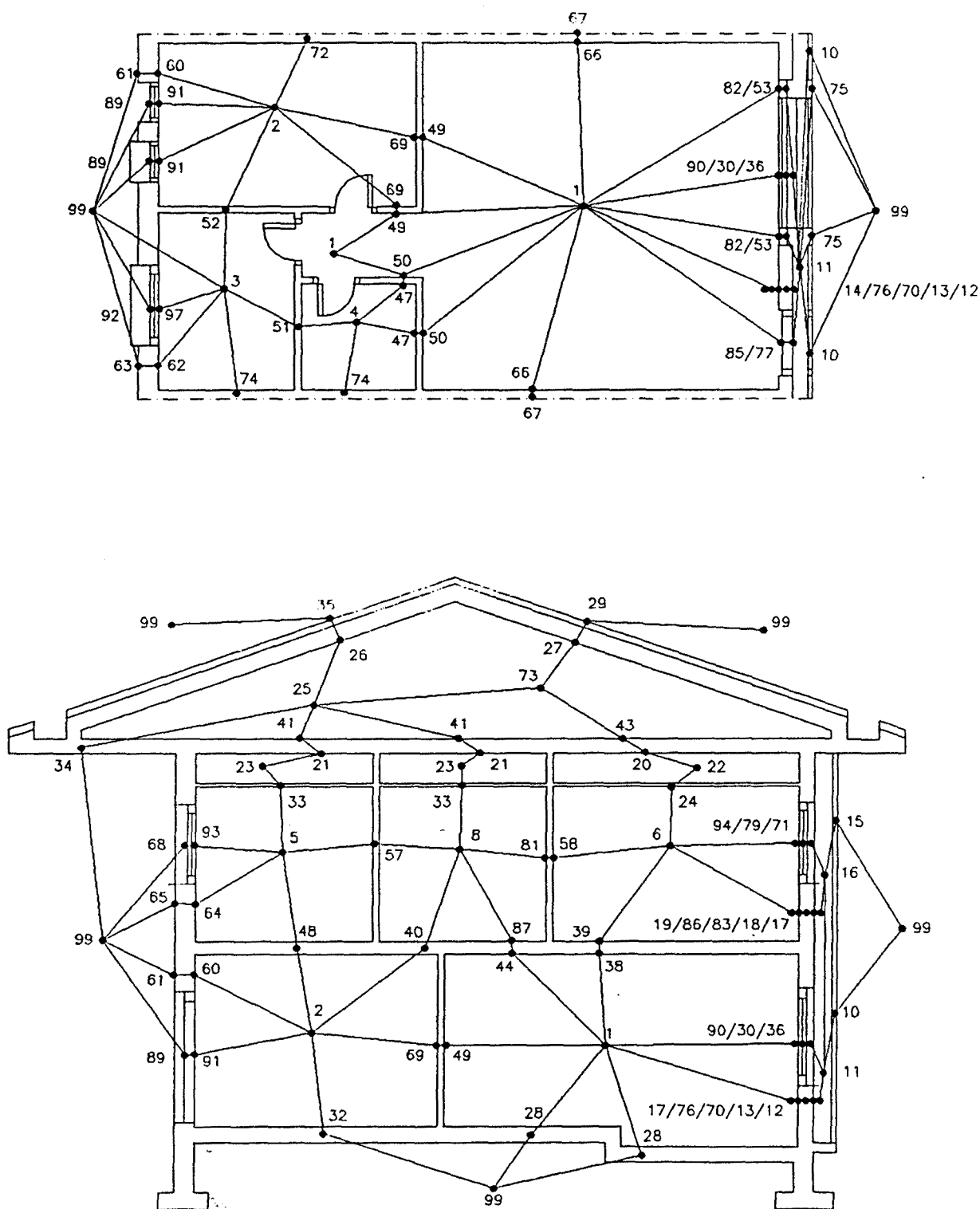


Fig.4.9: Enlaces conductivos y convectivos definidos entre los nodos.

Tabla 4.11: Descripción de los enlaces conductivos (tipo GM).

Enlace	Cálculo	Material	Área (m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Cond.térm. (W/m <sup>2</sup> °C)	Valor G <sub>i-j</sub> (W/°C)
14-76	Ec.3.2	Hormigón	8.7	0.05	1.63	283
76-70	Ec.3.2	Hormigón	8.7	0.05	1.63	283
70-13	Ec.3.2	Hormigón	8.7	0.05	1.63	283
13-12	Ec.3.2	Hormigón	8.7	0.05	1.63	283
85-77	Ec.3.2	Madera	2.1	0.06	0.14	4.9
90-30	Ec.3.2	Vidrio	4.5	0.006	1	750
30-36	Ajuste simulación	-	-	-	-	4.5
82-53	Ec.3.2	Aluminio	4.5	0.002	205	461000
19-18	Ec.3.2	Hormigón	13.6	0.05	1.63	443
18-83	Ec.3.2	Hormigón	13.6	0.05	1.63	443
83-86	Ec.3.2	Hormigón	13.6	0.05	1.63	443
86-17	Ec.3.2	Hormigón	13.6	0.05	1.63	443
94-79	Ajuste simulación	-	2.6	-	-	1.3
79-71	Ec.3.2	Vidrio	2.6	0.006	1	433
27-29	Ajuste simulación	-	31.8	-	-	150
26-35	Ajuste simulación	-	31.8	-	-	150
20-43	Ajuste simulación	Hormigón+boved.	18.5	0.04+0.18	?	220
21-41	Ajuste simulación	Hormigón+boved.	31.8	0.04+0.18	?	80
34-41	Ec.3.2	Hormigón+boved.	9	0.04+0.18	1.63/0.76	34
20-99	Ajuste simulación	-	-	-	-	10
43-99	Ajuste simulación	-	-	-	-	10
28-99	ASHRAE	-	31.6	-	-	5
31-99	ASHRAE	-	8.4	-	-	16
32-99	ASHRAE	-	9.3	-	-	18
60-61	Ec.3.2	EPS+ladr.perforado	5.2	0.05+0.25	0.033/0.76	2.82
62-63	Ec.3.2	EPS+ladr.perforado	7	0.05+0.25	0.033/0.76	3.25
64-65	Ec.3.2	EPS+ladr.perforado	13.7	0.05+0.25	0.033/0.76	7.43
66-67	Ec.3.2	Hormigón	30.8	0.20	1.63	251
38-39	Ec.3.2	Hormigón+boved.	18.2	0.08+0.20	1.63/0.76	58
44-87	Ec.3.2	Hormigón+boved.	4.3	0.08+0.20	1.63/0.76	14
49-69	Ec.3.2	Ladr. hueco+yaso	10.4	0.12	0.49	42.5
50-47	Ec.3.2	Ladr. hueco+yaso	8.3	0.12	0.49	33.9
54-84	Ec.3.2	Ladr. hueco+yaso	6.3	0.12	0.49	25.7
58-81	Ec.3.2	Ladr. hueco+yaso	6.1	0.12	0.49	24.9
91-89	Ec.3.2	Vidrio	1.8	0.003	1	600
92-97	Ajuste simulación	-	1.4	-	-	0.65
93-68	Ajuste simulación	-	2.8	-	-	1.3
1-11	Ajuste simulación y Ec.3.3	-	-	-	-	2.9

Tabla 4.11 (Cont.): Descripción de los enlaces conductivos (tipo GM).

Enlace	Cálculo	Material	Área (m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Cond.térm. (W/m <sup>2</sup> °C)	Valor G <sub>i-j</sub> (W/°C)
2-99	Ajuste simulación y Ec33	-	-	-	-	0.8
3-99	Ajuste simulación y Ec33	-	-	-	-	0.5
5-99	Ajuste simulación y Ec33	-	-	-	-	1.16
6-16	Ajuste simulación y Ec33	-	-	-	-	0.81
7-16	Ajuste simulación y Ec33	-	-	-	-	0.61

sario definir los enlaces 20-99 y 43-99 para poder obtener un ajuste entre los resultados experimentales y los simulados. En el mismo sentido hay que considerar la desviación respecto al valor analítico, obtenida para el enlace 21-41, y la forma en que se ha definido el nodo 41, solapando los nodos 21 y 34, para poder tener en cuenta la influencia del puente térmico debido al voladizo de la fachada norte.

Otro punto en el que se nos presentaba un cierto grado de incertidumbre inicial, eran las condiciones de contorno a fijar en las paredes laterales. La incognita es consecuencia del hecho que, mientras la casa que estamos modelizando ha estado desocupada, las colindantes no, por lo que las condiciones térmicas establecidas en cada una de ellas iban a ser distintas. Y ello acentuado por el hecho de que las paredes de separación son de un material buen conductor del calor, como lo es el hormigón. Ante esta dificultad, la alternativa planteada inicialmente fue la de considerar los muros de separación partidos por su eje de simetría y tomarlos como adiabáticos. Esta hipótesis, utilizada en los experimentos planteados en la Sección 4.2.2, sería válida en la medida que las condiciones térmicas reinantes en los edificios fueran idénticas, lo cual sería totalmente cierto si todos ellos se hubieran encontrado en régimen de fluctuación libre sin empleo de energía auxiliar. Los resultados encontrados a lo largo del proceso de contrastación nos permitieron observar que, si bien, estos eran buenos para la mayoría de habitaciones, no pasaba lo mismo para el comedor-sala de estar, en donde, y únicamente para el periodo invernal, siempre se apreciaban temperaturas simuladas inferiores a las obtenidas en el seguimiento. Es por este motivo que decidimos modificar, para esta habitación, sus condiciones de frontera planteadas inicialmente. La nueva hipótesis fue la de considerar que en las habitaciones contiguas de las casas vecinas se dieran condiciones de confort térmico (lo cual es totalmente razonable si tenemos en cuenta el hecho de que ésta es la principal dependencia de la casa). Ello comportó definir un nuevo enlace entre las dos caras del muro de separación (el 66-67), estableciendo una temperatura constante de 18°C para la superficie de la cara perteneciente a la casa colindante (lo cual corresponde aproximadamente a una temperatura del aire de esa dependencia de 20°C). Fue de esta forma que se encontró una buena convergencia entre los resultados simulados y los procedentes del seguimiento.<sup>1</sup>

También ha sido necesario recurrir a los resultados de la simulación para poder determinar el valor de los enlaces existentes entre los nodos del tejado (27-29, 26-35), ya que este está formado por tejas de hormigón, que dejan un pequeño espacio entre ellas, y a través

<sup>1</sup> Se nos podría plantear aquí, cómo es que para las otras habitaciones no se ha adoptado la misma hipótesis. La respuesta sería que los resultados obtenidos con la hipótesis inicial ya fueron correctos. Y su justificación vendría a partir del hecho de que, si bien es lógico suponer que los habitantes de una casa (sin calefacción central, como las aquí tratadas) quieran mantener condiciones de confort térmico en la habitación principal, no lo es tanto que ocurra lo mismo para el resto de dependencias, al menos de una forma, más o menos, permanente. Los resultados de las encuestas a los usuarios de la Tabla 2.3, apoyan en parte esta hipótesis, en la medida que en las dos casas vecinas a la nuestra (las números 14 y 16) el trabajo de la mujer es doméstico, con perfiles de ocupación medios (2.2 y 1.5 personas/día, respectivamente).



del que se producen unas infiltraciones nada despreciables (puesto que las tejas no tienen una base de ladrillo machihembrado que impida la circulación de aire), lo cual hacía imposible predecir su valor de forma analítica. Otra situación en la que ha sido también necesario recurrir a la simulación, es el de los enlaces por convección y radiación existentes entre el vidrio de las ventanas y sus persianas y/o postigos. El motivo se debe a la dificultad inherente a la modelización de la convección, por un lado, y a un desconocimiento de las propiedades radiantes de los materiales implicados en el proceso, por otro. Por lo que hace referencia al valor de los enlaces que evalúan las pérdidas por el suelo se han calculado a partir de las expresiones propuestas por ASHRAE [1]. En todos estos casos, se ha definido entre los nodos considerados, un coeficiente global de transmisión de calor equivalente.

Para el cálculo del número de renovaciones por hora, necesario para poder evaluar las pérdidas por infiltración, también se ha tenido que recurrir a los resultados de la simulación, ya que no se dispuso del equipo experimental adecuado. Los valores hallados mediante este tipo de ajuste son pequeños, lo cual se atribuye al hecho de encontrarse la casa deshabitada y con las persianas y postigos cerrados de forma permanente.

#### 4.3.3 Definición de enlaces convectivos.

Vimos anteriormente que los enlaces convectivos pueden ser, también de dos tipos: los que nos permiten definir el intercambio por convección natural entre una superficie y el aire en contacto con ella (tipo HM), y los que permiten evaluar el intercambio entre dos recintos a través de aberturas de conexión (tipo VM). En el cálculo de los primeros, ya dijimos en el Capítulo anterior, que el programa PASSIM utiliza las expresiones empíricas habituales, definiendo, según se muestra en la Tabla 4.12, cuatro tipos posibles de configuraciones geométricas a utilizar. Debido al gran número de enlaces, de este tipo, definidos en nuestro modelo y, al hecho que no presenta especial dificultad su definición, no se han listado aquí, pero pueden encontrarse expuestos en el fichero de configuración correspondiente, presentado en el Apéndice B.

**Tabla 4.12:** Enlaces convectivos del tipo HM definidos en el PASSIM.

Código	Configuración
1	Intercambio superficie vertical-aire
2	Intercambio superficie horizontal-aire por encima
3	Intercambio superficie horizontal-aire por debajo
4	Intercambio entre dos superficies verticales separadas por una cámara de aire

Por lo que hace referencia a los enlaces por convección natural a través de aberturas de conexión entre recintos, se han definido los mostrados en la Tabla 4.13. Se ha comprobado que la expresión propuesta por el programa PASSIM (Ec.3.5), a partir del trabajo del grupo de Balcomb (referencias 7 y 8 del Capítulo anterior), conduce a resultados equivalentes a los obtenidos con la expresión recomendada por el grupo de trabajo en energía solar de la C.E.C. [2], obtenida por Walker [3]. Al igual que para los enlaces conductivos hay algunos casos en los que ha sido necesario recurrir al mismo proceso de simulación para poder obtener el valor correcto de estos enlaces. Es lo sucedido para el cálculo del valor de la ventilación a la que está sometido el muro Trombe (enlaces 11-99 y 16-99) y de las infiltraciones a través del tejado (enlaces 25-99 y 73-99).

**Tabla 4.13:** Enlaces del tipo convectivo VM definidos en el modelo presentado.

Enlace	Cálculo	Conductancia equiv. (W/°C)
11-99	Ajuste simulación	15
16-99	Ajuste simulación	5
16-22	Ec.3.5	3.2
23-99	Ec.3.5	3.2
25-99	Ajuste simulación	20
73-99	Ajuste simulación	20

Podríamos incluir aquí un último grupo de enlaces, es el de los enlaces debidos al intercambio entre capas de aire dispuestas verticalmente, cuando la temperatura de la capa inferior es mayor que la superior (intercambios por estratificación, tipo SM). En la documentación que acompaña al programa PASSIM no se da información acerca de la expresión utilizada para su cálculo, estableciéndose únicamente la forma de definirlos (en función del área horizontal de intercambio). En nuestro modelo son sólo dos los enlaces de este tipo definidos, los correspondientes a la estratificación existente en la escalera de conexión entre planta baja y el piso (enlace 1-9), y la que se produce entre los dos nodos con los que se ha modelizado el aire de la cámara del muro Trombe (enlace 11-16).

**4.3.4 Definición de enlaces radiativos.**

Dentro de este apartado, también, hay que considerar dos tipos distintos de enlaces: los debidos al intercambio radiante entre superficies en la banda térmica (tipo RM) y los debidos al calor absorbido a partir de una radiación solar incidente, que trataremos, a continuación, dentro de los enlaces del tipo EM (aporte energético debido a una fuente de calor exterior). Entre los primeros deben de incluirse tanto los intercambios entre dos elementos interiores del edificio (paredes, techo, suelo, ventanas,...) que puedan verse directamente, como los existentes entre los elementos exteriores con el cielo y el suelo. Al igual que para los enlaces convectivos del tipo HM, a causa del gran número de estos enlaces definidos, no los describiremos aquí, sin embargo, pueden encontrarse en el listado del fichero de configuración presentado en el Apéndice B. Sólomente decir que se han calculado según la expresión propuesta por el programa PASSIM (Ec.3.7), una vez determinado el factor de vista correspondiente (que se ha calculado a su vez mediante la utilización del programa AIRES o mediante el desarrollado por nosotros, cuando en el intercambio se presentan superficies no rectangulares).

**4.3.5 Definición de enlaces debidos a una fuente de calor exterior.**

En esta tipología deben de considerarse aquellos aportes de calor debidos a una fuente de calor exterior, como pueden serlo: la radiación solar absorbida por un elemento, la existencia de una fuente de energía auxiliar o las debidas a las ganancias internas del propio edificio. Ya dijimos en el Capítulo anterior que el programa PASSIM permite el cálculo de la radiación solar incidente, directa y difusa, sobre una superficie cualquiera a partir de la radiación solar global incidente sobre una superficie horizontal. Igualmente ofrece la posibilidad de calcular las propiedades radiantes direccionales de un vidrio a partir de su coeficiente de extinción y espesor, utilizando para ello las expresiones dadas en [4]. Todo ello permite calcular fácilmente la radiación solar absorbida por un elemento cualquiera, teniendo en

cuenta, además, el posible efecto de sombreamiento causado por elementos de protección solar u otros obstáculos. La principal fuente de error en este tipo de enlaces, es la debida a la posible indeterminación existente en el valor de las propiedades radiantes de los materiales constituyentes de los diferentes nodos, habiéndose realizado, también aquí, una labor de ajuste a partir de los resultados de la modelización.

Por lo que hace referencia a otros tipos de aporte energético exterior, ya que la casa se encontró deshabitada durante el periodo simulado, sólo se ha tenido que considerar el debido al equipo de seguimiento instalado en la habitación 3. Pudiéndose incluir fácilmente, tal como hremos en el próximo Capítulo, la posible utilización de energía auxiliar, ya sea para la calefacción como para la refrigeración del edificio. Todos los valores correspondientes a este tipo de enlaces pueden encontrarse al final del fichero de configuración presentado en el Apéndice B.

#### 4.3.6 Apertura de ventanas.

Aunque en este Capítulo no vayamos a considerar la posibilidad de la apertura de persianas y postigos, sí ha sido considerada ésta en el modelo elaborado, lo cual nos permitirá evaluar, posteriormente, su influencia en el comportamiento energético del edificio. Ello tiene una incidencia especial a la hora de pensar la forma de realizar la descomposición nodal en los elementos frontera. El programa PASSIM permite considerar esta posibilidad, a partir de un tipo de instrucciones (CMT y CMJ) que permiten conectar o desconectar un enlace determinado a lo largo de un cierto intervalo de tiempo.

#### 4.3.7 Definición de las condiciones iniciales.

Como consecuencia de no disponer de un registro experimental de las temperaturas de todos los nodos considerados, y para poder establecer unas condiciones iniciales que no distorsionaran el resultado de la simulación más allá de un periodo inicial de estabilización, se tomaron como temperaturas iniciales las resultantes de realizar una ejecución previa del modelo. Considerándose, a su vez, en ésta una temperatura inicial uniforme en toda la casa, que fue de 15°C para el periodo invernal y de 25°C para el estival, presentándose un periodo de estabilización de unos 10 días para el primero y reduciéndose a dos para el segundo (como consecuencia del menor gradiente de temperaturas existente en el edificio en este periodo). Una vez realizada esta primera simulación, se tomaron como temperaturas iniciales de cálculo, las obtenidas en el último día de esta simulación previa.

---

Creemos necesario volver a destacar, que este modelo presentado aquí, además de adaptarse a los criterios deducidos en el Apartado 4.2, ha estado sometido a multiples ensayos de contrastación con los resultados experimentales, hasta que se ha logrado un resultado, cuando menos, aceptable. Ello no impide que éste resultado final sea susceptible, evidentemente, de ser mejorado.

#### 4.4 Resultados de la modelización: Temperaturas.

Una vez expuesto el modelo térmico de la casa escogida, pasaremos a presentar los resultados obtenidos en la simulación. Ya que, como hemos dicho, disponemos de datos experimentales del seguimiento realizado en el conjunto bioclimático de Begues, presentaremos estos resultados de forma conjunta para poder compararlos

Tal como hemos comentado, el modelo de la casa nº 15 expuesto en el apartado anterior, es el resultado final de una larga serie de ensayos y comparaciones realizadas con los datos disponibles del seguimiento y, por el mismo motivo, lo es la contrastación que ahora presentamos.

Para llegar a ella se ha recurrido al método de ensayo-error, de forma que partiendo de un modelo inicial, en consonancia con los resultados de los experimentos numéricos realizados en el Apartado 4.2, se han ido modificando distintas variables hasta conseguir el ajuste deseado. Estas variables susceptibles de modificación pueden ser de distintos tipos: geométricas, cuando la geometría no estaba totalmente definida; propiedades termofísicas de los materiales (como la densidad, la conductividad térmica, el calor específico), que conllevan siempre un cierto grado de indeterminación por falta de información adecuada; número de nodos utilizados para descomponer un elemento determinado, o inherentes al mismo proceso de transferencia de calor, como pueden ser: los coeficientes de transmisión de calor por convección, las propiedades radiantes de los materiales, etc.

El largo camino seguido para llegar a esta contrastación, nos sugiere algunas cuestiones marginales importantes. Si después de habernos planteado, por medio de los experimentos numéricos realizados, un análisis preliminar que nos permitiera abordar con un cierto fundamento la tarea de la descomposición nodal y, después de haber establecido con mucho cuidado los enlaces existentes entre los distintos nodos seleccionados, hemos tenido todavía que seguir un largo camino para poder obtener una contrastación como la presentada a continuación (que consideramos cuando menos aceptable), la primera cuestión que se nos plantea es que, por lo menos, la modelización térmica de un edificio es un trabajo sumamente delicado, sometido a una larga serie de indeterminaciones que afectan de forma directa al resultado final.

Partiendo de este hecho y ahondando un poco más en la cuestión, podemos plantearnos la siguiente pregunta ¿en qué medida la modelización térmica de un edificio, que no ha podido ser sometida a contrastación experimental por falta de datos o por el hecho de que el edificio no haya sido todavía construido, puede predecir su comportamiento térmico?. Si la respuesta a esta pregunta no es clara, deberemos de seguir preguntándonos, ¿de qué nos sirve entonces disponer de instrumentos que nos permiten simular las transferencias energéticas existentes en un edificio? La respuesta podría ser que, si bien, estos instrumentos no nos permiten predecir con exactitud el comportamiento térmico final de un edificio, sí que nos permitirán, en una fase de diseño, discernir entre distintas alternativas planteadas, aportándonos una información adicional que de otra forma no nos sería posible conseguir. Dicho con otras palabras, los programas de cálculo que nos permiten abordar la modelización térmica de edificios, más bien parece que deban de ser tomados como instrumentos de orientación, que de predicción.

##### 4.4.1 Contrastación experimental.

Volviendo al tema de la contrastación entre el modelo numérico de la casa nº 15 de Begues y los datos del seguimiento, decir que ésta se ha realizado para distintas épocas del año, correspondientes al período de seguimiento del cual se disponían datos fiables. Como ya se ha comentado, debido a diversos motivos, éste quedó desafortunadamente restringido a algo menos de un año, encontrándose, además, los datos muy fragmentados, ya que son pocos los

casos en los que se superan registros de más de 30 días consecutivos. En aras de la claridad en la exposición gráfica, de estos registros se seleccionaron para la contrastación, cuatro periodos de 10 días cada uno, repartidos a lo largo del año. Son los siguientes:

- B.8: abarca los días 150 a 160 de un intervalo de seguimiento comprendido entre los días 145 y 184, que corresponden aproximadamente a la primera decena del mes de junio.
- B.9: abarca los días 190 a 200 de un intervalo de seguimiento comprendido entre los días 187 y 221, que corresponden aproximadamente a la segunda decena del mes de julio.
- B.12: abarca los días 320 a 330 de un intervalo de seguimiento comprendido entre los días 314 y 330, que corresponden aproximadamente a la tercera decena del mes de noviembre.
- B.13: abarca los días 340 a 350 de un intervalo de seguimiento comprendido entre los días 336 y 353, que corresponden aproximadamente a la segunda decena del mes de diciembre.

Los datos disponibles en el seguimiento son las temperaturas del aire en ocho puntos distintos de la casa, correspondientes a otras tantas habitaciones o zonas de la vivienda considerada, y en base a ellos se realizó la contrastación. Estos puntos corresponden a:

- $T_1$ : temperatura del aire del comedor-sala de estar, situado por detrás del Trombe.
- $T_2$ : temperatura del aire de la cocina, situada en la planta baja y orientada al norte.
- $T_6$ : temperatura del aire de la habitación nº 6, situada por detrás del Trombe en el piso superior.
- $T_5$ : temperatura del aire de la habitación nº 5, orientada al norte en el piso superior.
- $T_{22}$ : temperatura del aire del falso techo en contacto con el muro Trombe.
- $T_{23}$ : temperatura del aire del falso techo por su parte norte.
- $T_{11}$ : temperatura del aire de la parte del muro Trombe correspondiente al piso inferior.
- $T_{16}$ : temperatura del aire de la parte del muro Trombe correspondiente al piso superior.

En las Figs.4.10-4.13 se muestran los resultados obtenidos de forma conjunta, para los distintos casos analizados. Como puede verse la correspondencia, en general, es buena, y en algunos casos excelente, solamente pueden observarse algunas desviaciones, más o menos importantes, en algunos casos concretos. Efectivamente, para las habitaciones orientadas a sur ( $T_1$  y  $T_6$ ) sólo se supera en un caso (periodo B.12) una diferencia máxima de  $1^{\circ}\text{C}$  entre la temperatura registrada y la simulada. En cambio, para las temperaturas de las habitaciones orientadas a norte ( $T_2$  y  $T_5$ ), mientras la convergencia es excelente para los periodos estivales (B.8 y B.9), en los periodos invernales pueden observarse diferencias algo mayores. Por lo que hace referencia a las temperaturas del falso techo ( $T_{22}$  y  $T_{23}$ ), conectado al Trombe por su parte sur y al exterior por la norte, aunque la amplitud de las oscilaciones es coincidente, puede observarse un cierto desfase, sobretodo en la fase de enfriamiento, entre las temperaturas registrada y simulada del falso techo sur. Comentar que en este caso, la contrastación se ve sometida a dos fuentes de incertidumbre distintas, como lo son, por un lado, el grado de renovación del aire encerrado y, por otro, la influencia de los puentes térmicos constituidos por los voladizos de las fachadas norte y sur. Finalmente, podríamos calificar casi de sorprendente, la convergencia existente entre las temperaturas registrada y simulada del muro Trombe, sobretodo teniendo en cuenta la simplicidad de la ecuación (3.5) utilizada para el cálculo de la ventilación a que está sometido; solamente en los periodos estivales y para la temperatura del aire en su parte inferior se producen desviaciones considerables en los momentos de máximo calentamiento.

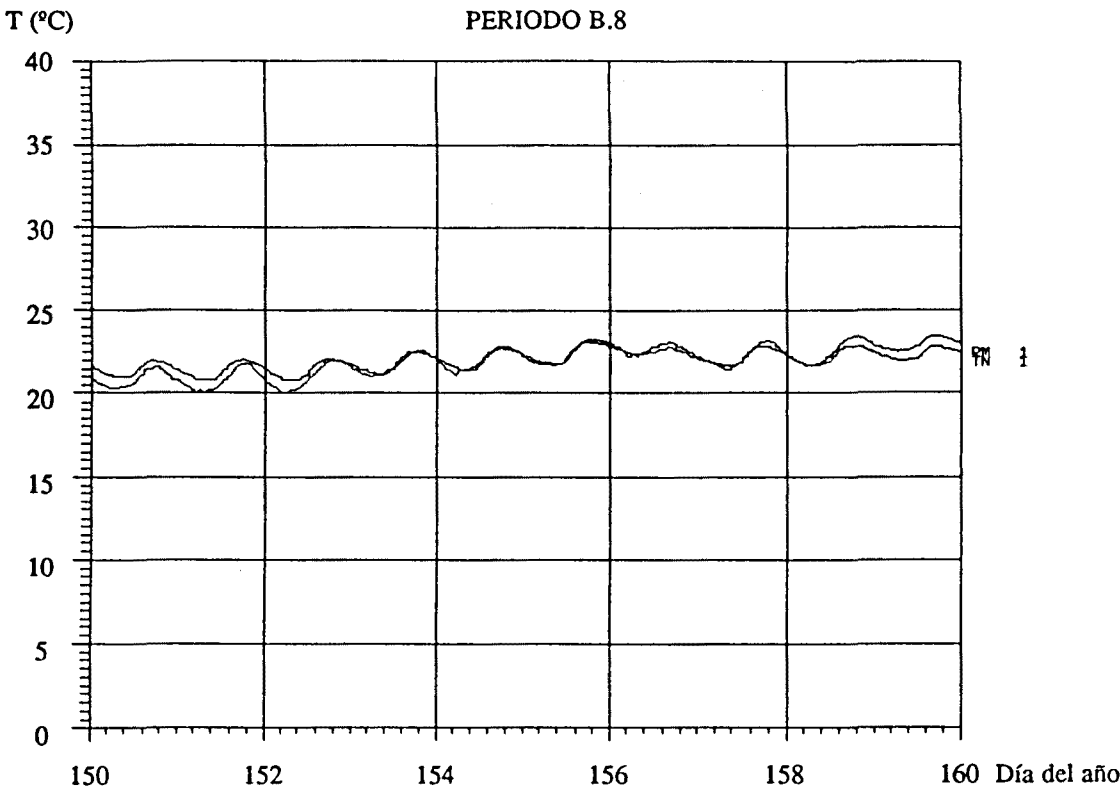


Fig.4.10a: Temperaturas registradas y simuladas en el comedor-sala de estar ( $T_1$ ).

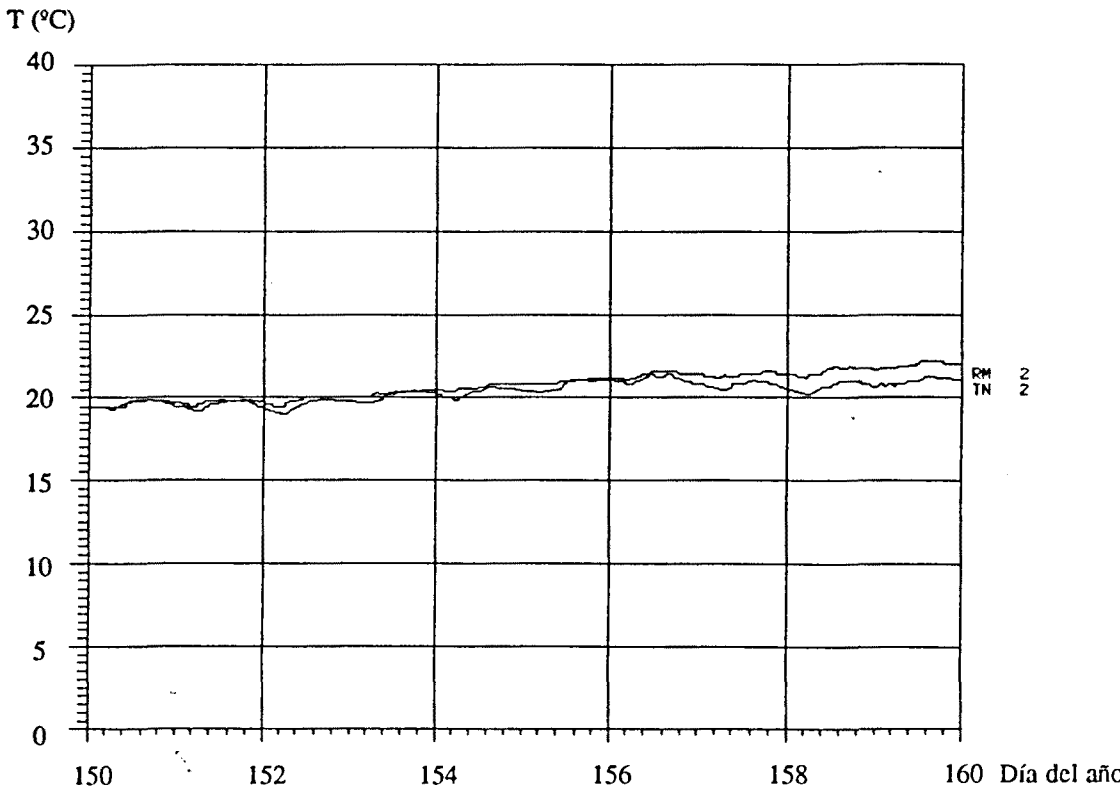
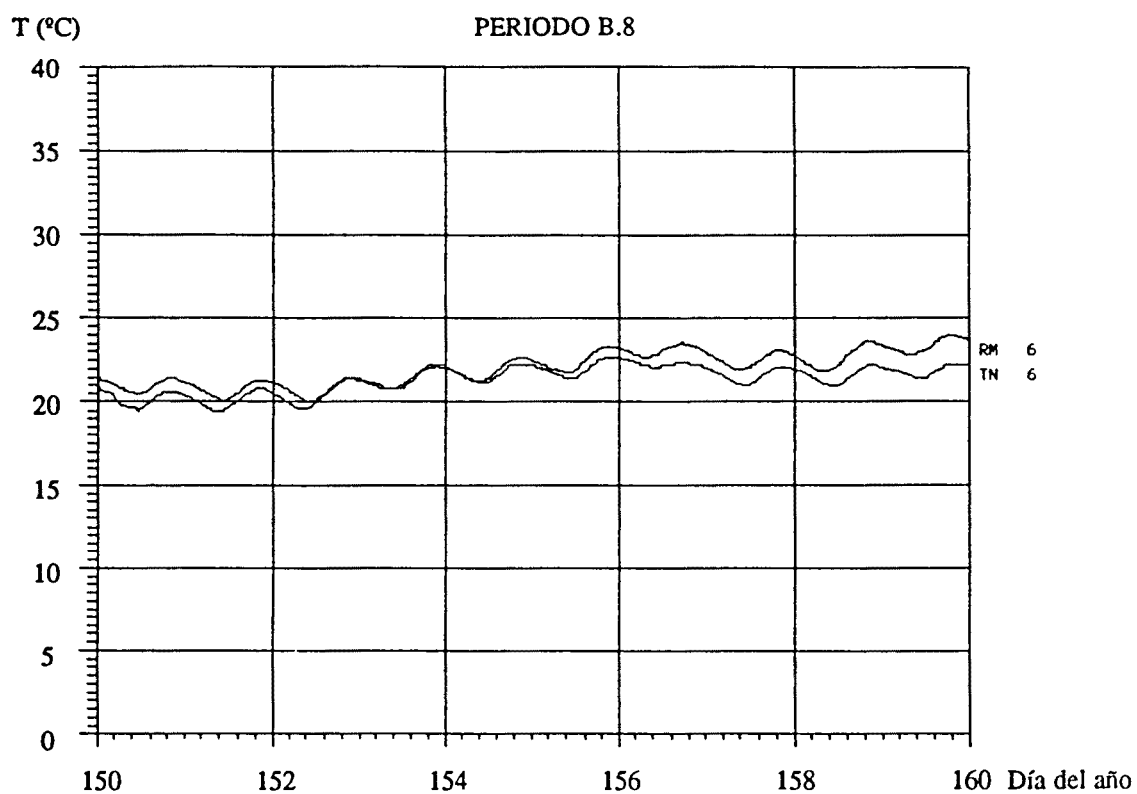
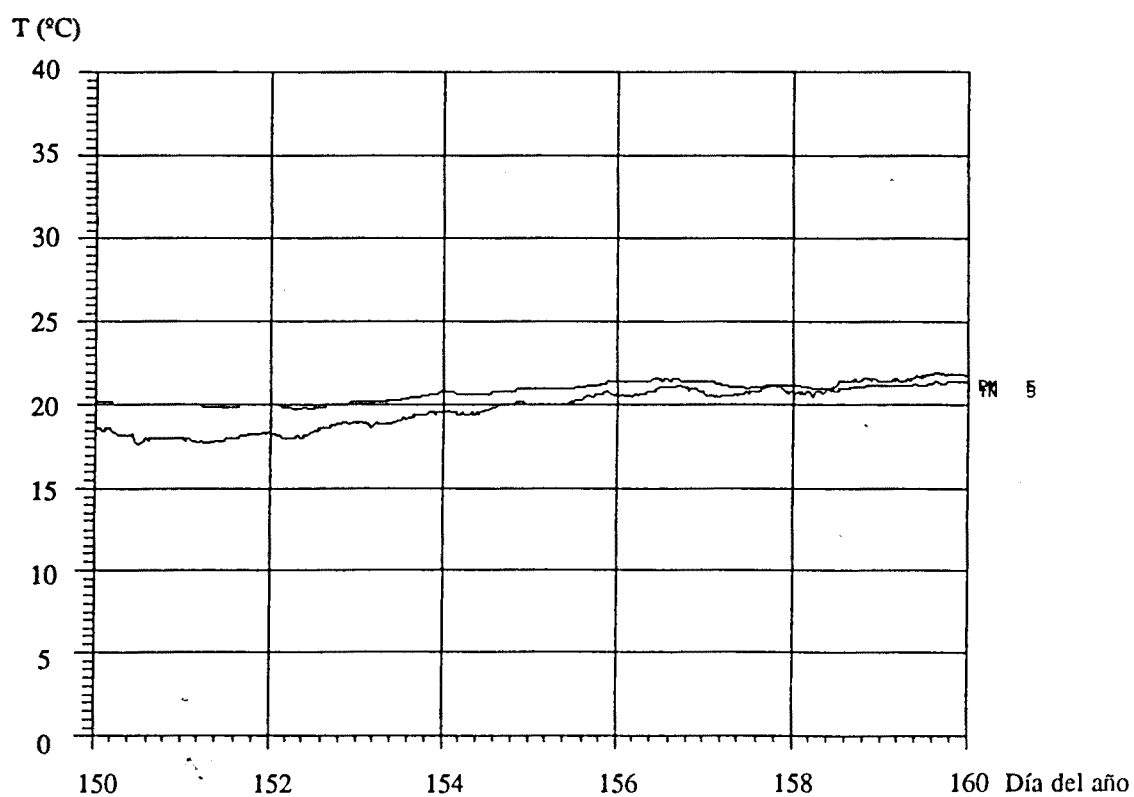
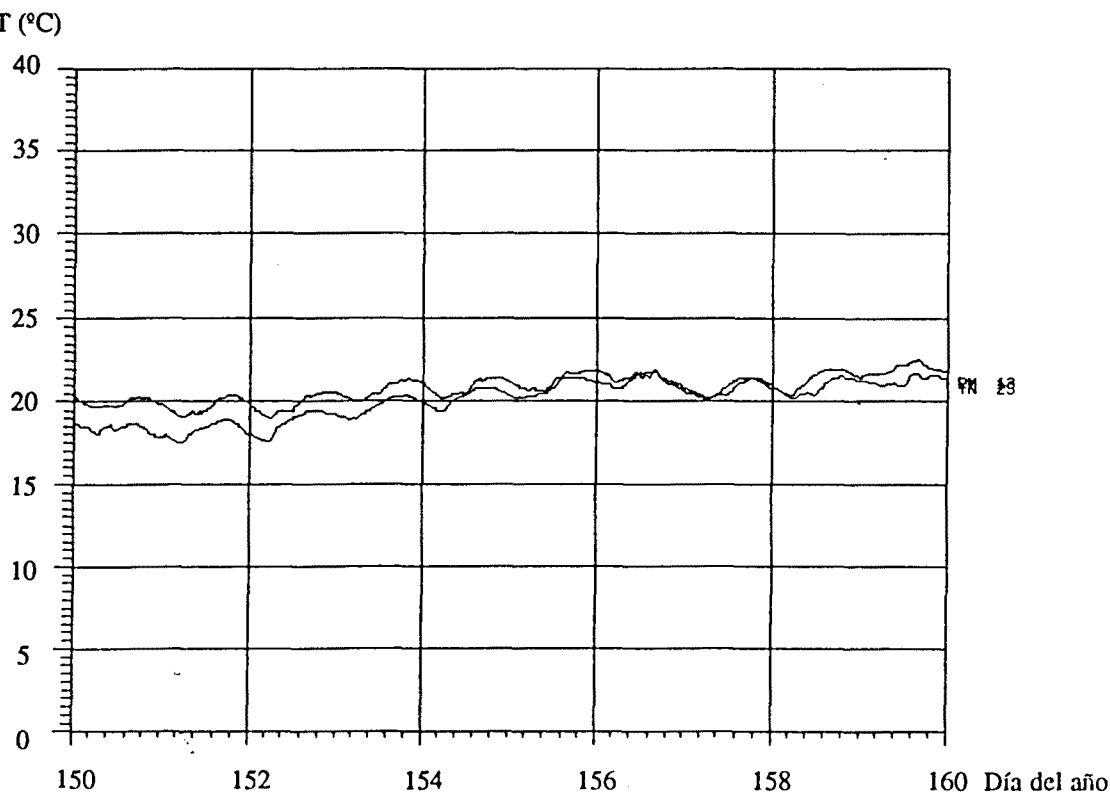
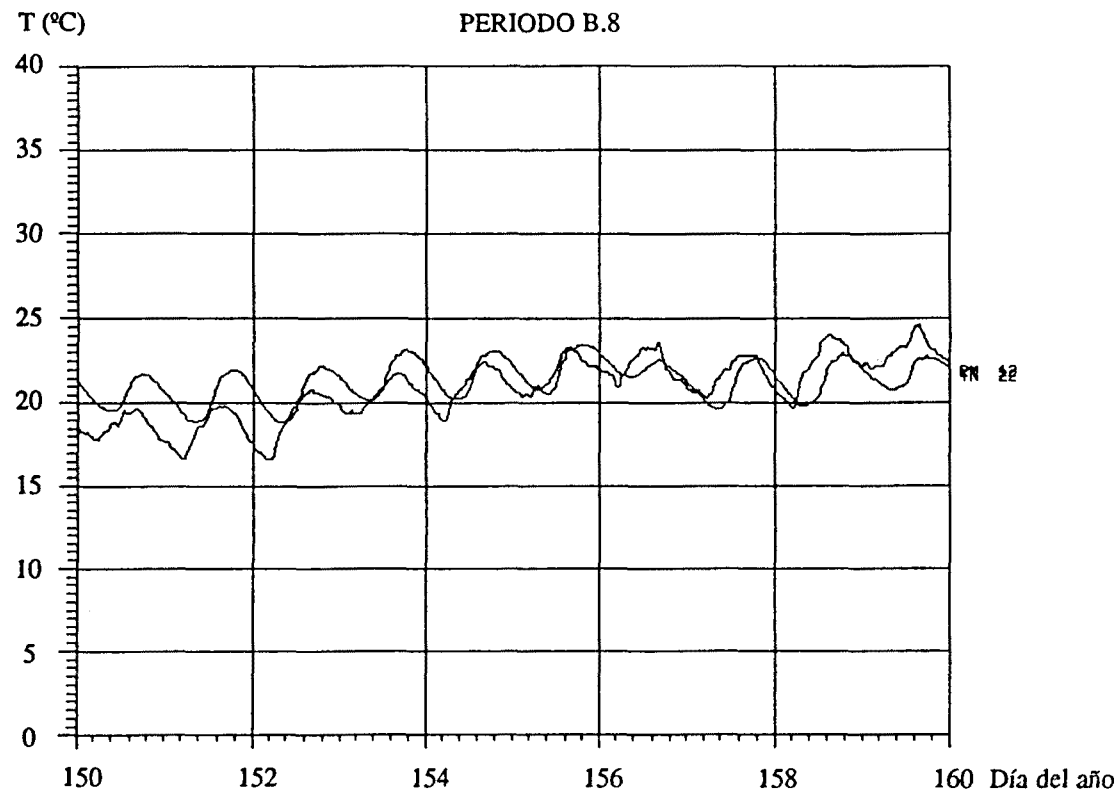


Fig.4.10b: Temperaturas registradas y simuladas en la cocina ( $T_2$ ).

Fig.4.10c: Temperaturas registradas y simuladas en la habitación 6 ( $T_6$ ).Fig.4.10d: Temperaturas registradas y simuladas en la habitación 5 ( $T_5$ ).





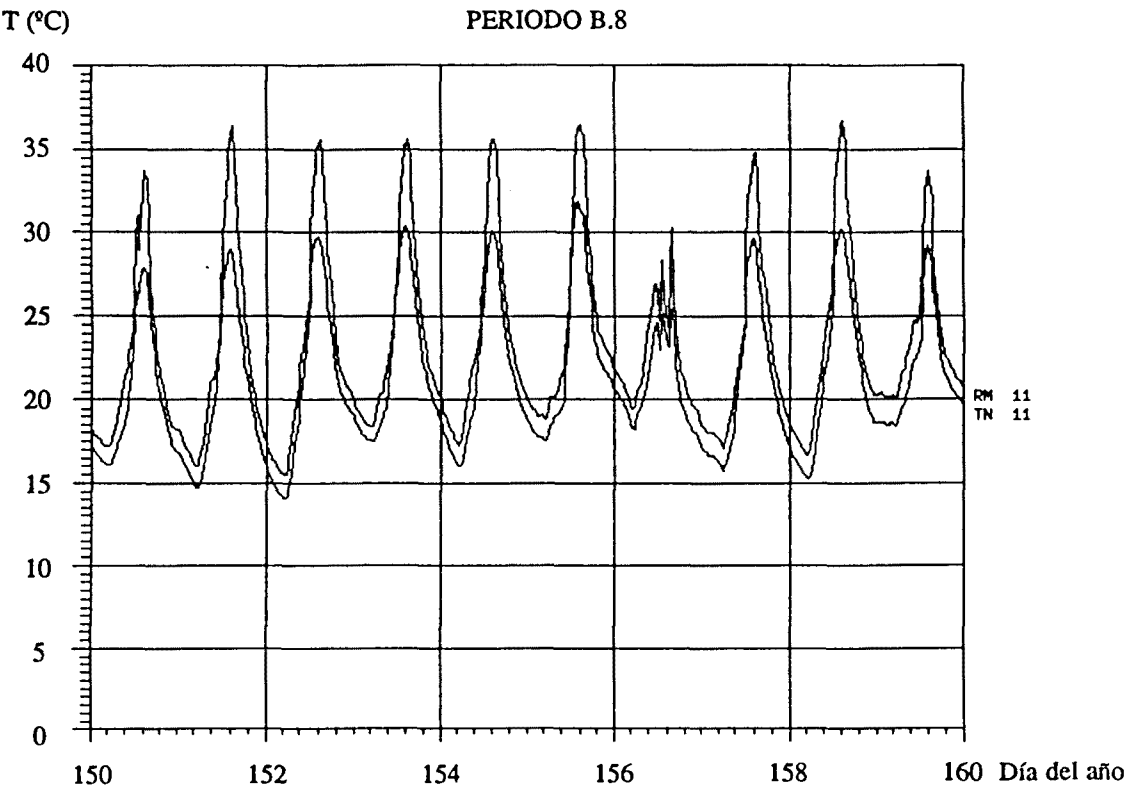


Fig.4.10g: Temperaturas registradas y simuladas en la parte inferior del Trombe (T<sub>11</sub>).

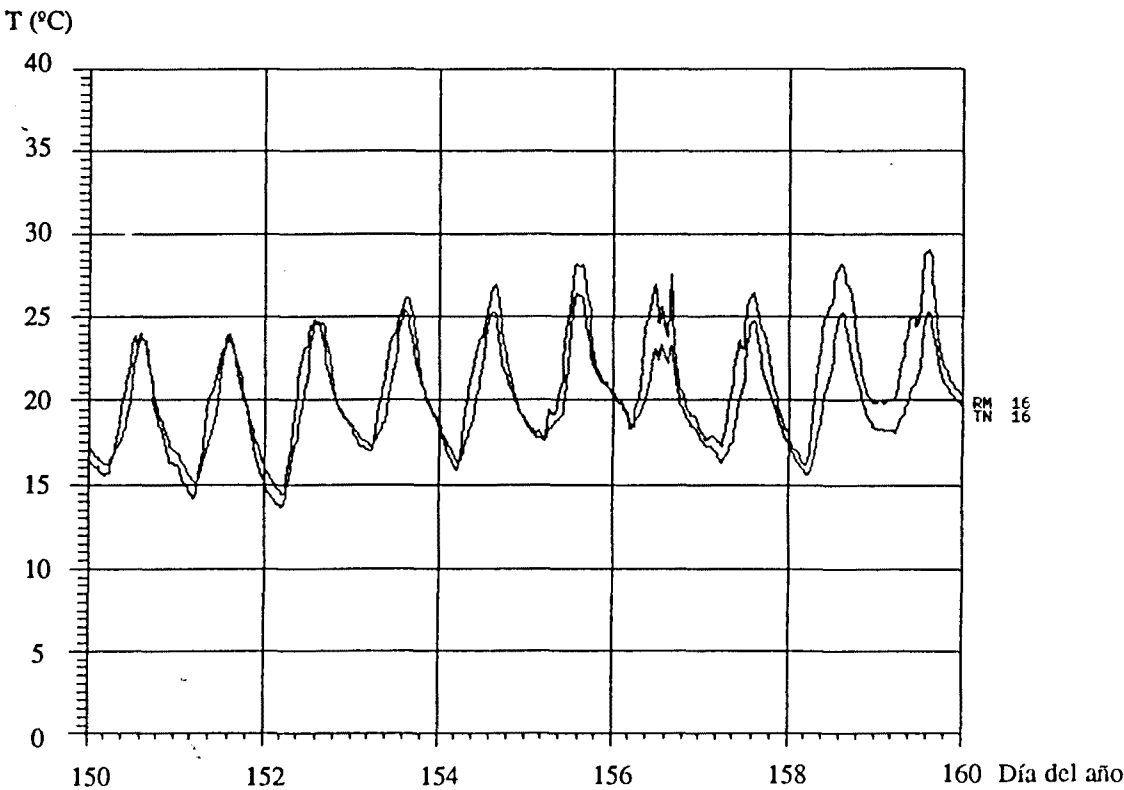


Fig.4.10h: Temperaturas registradas y simuladas en la parte superior del Trombe (T<sub>16</sub>).

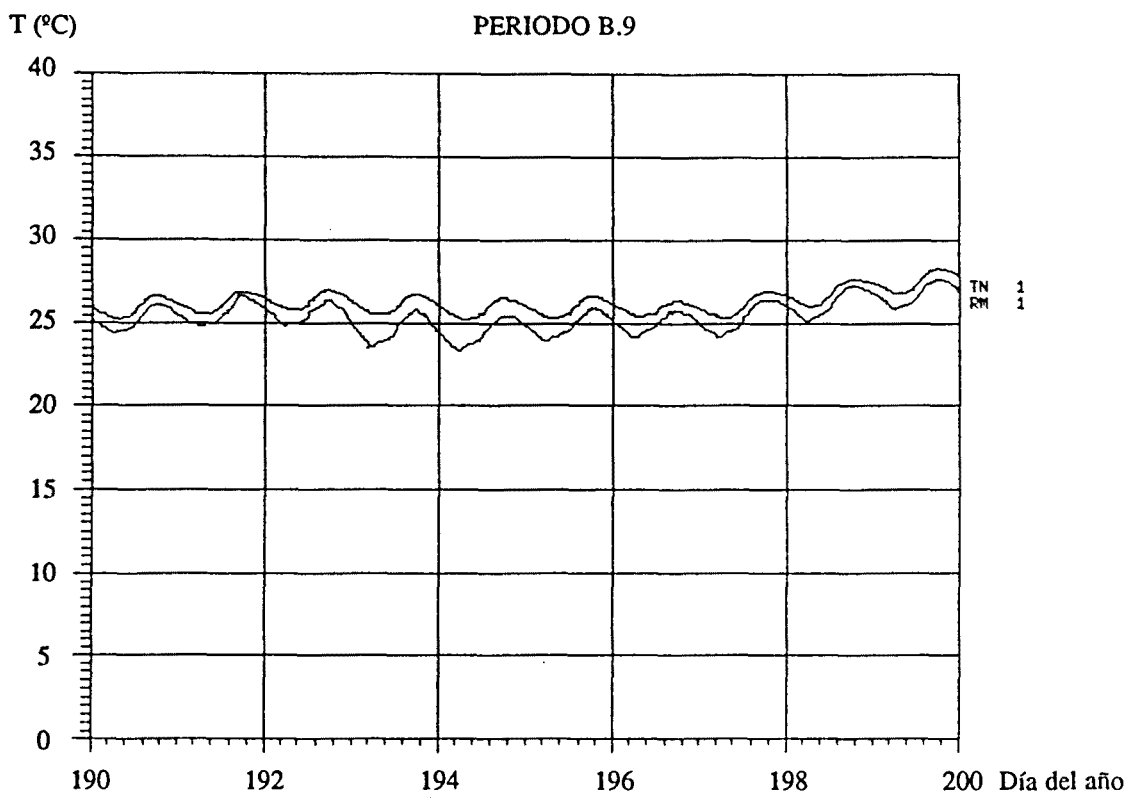


Fig.4.11a: Temperaturas registradas y simuladas en el comedor -sala de estar ( $T_1$ ).

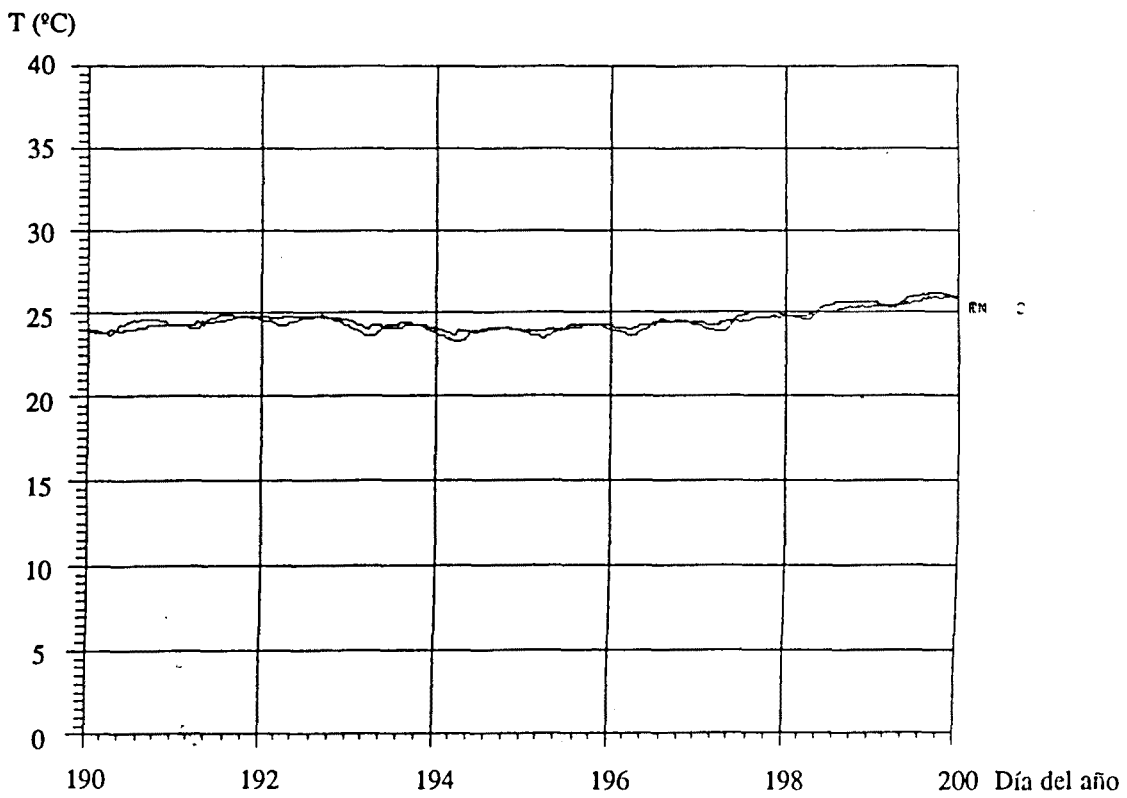


Fig.4.11b: Temperaturas registradas y simuladas en la cocina ( $T_2$ ).

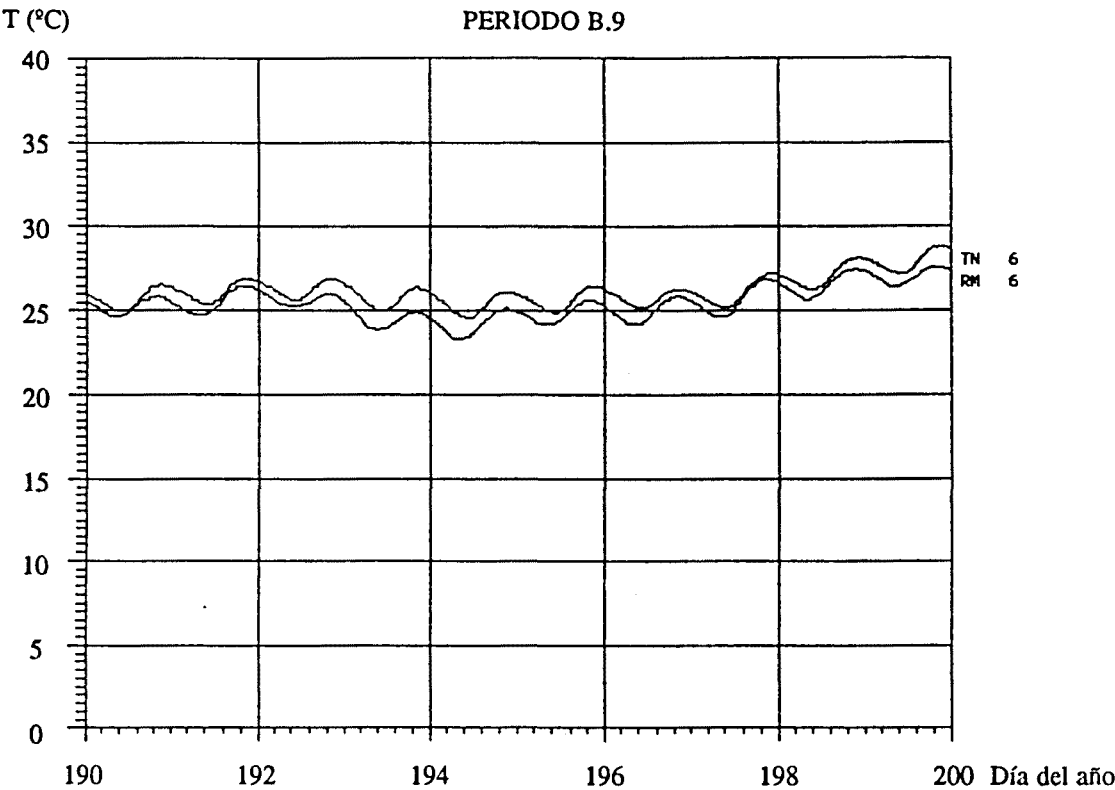


Fig.4.11c: Temperaturas registradas y simuladas en la habitación 6 ( $T_6$ ).

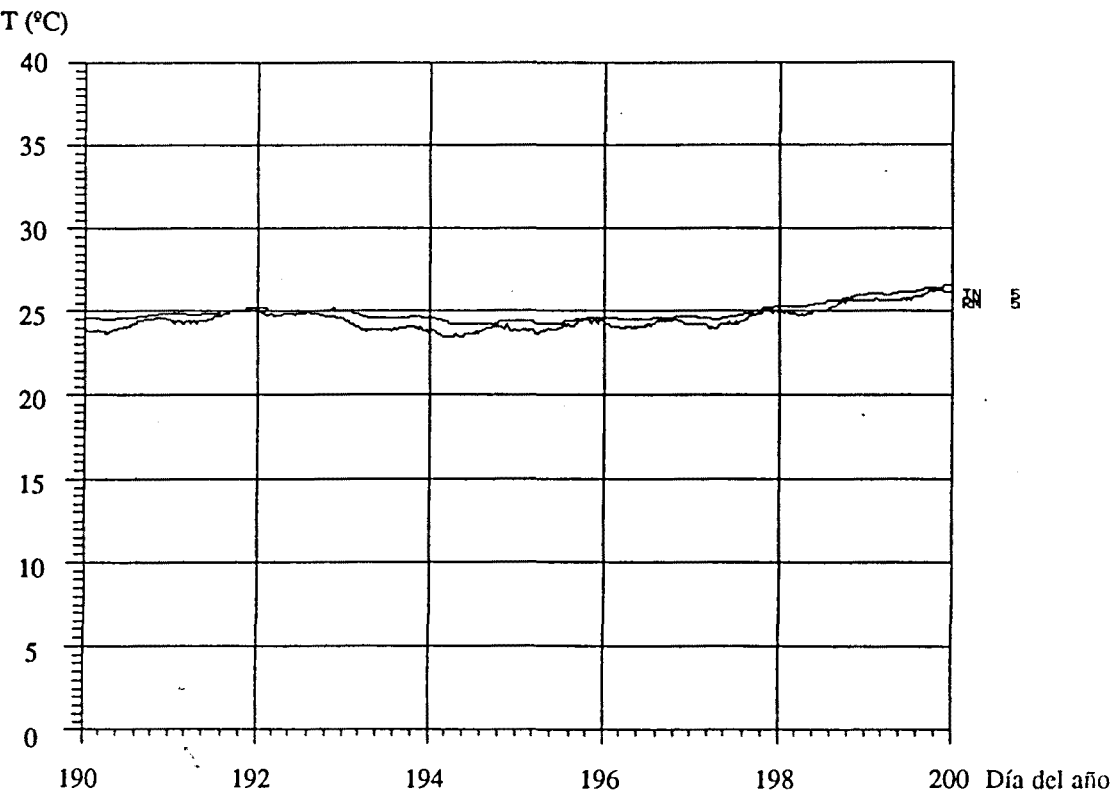


Fig.4.11d: Temperaturas registradas y simuladas en la habitación 5 ( $T_5$ ).

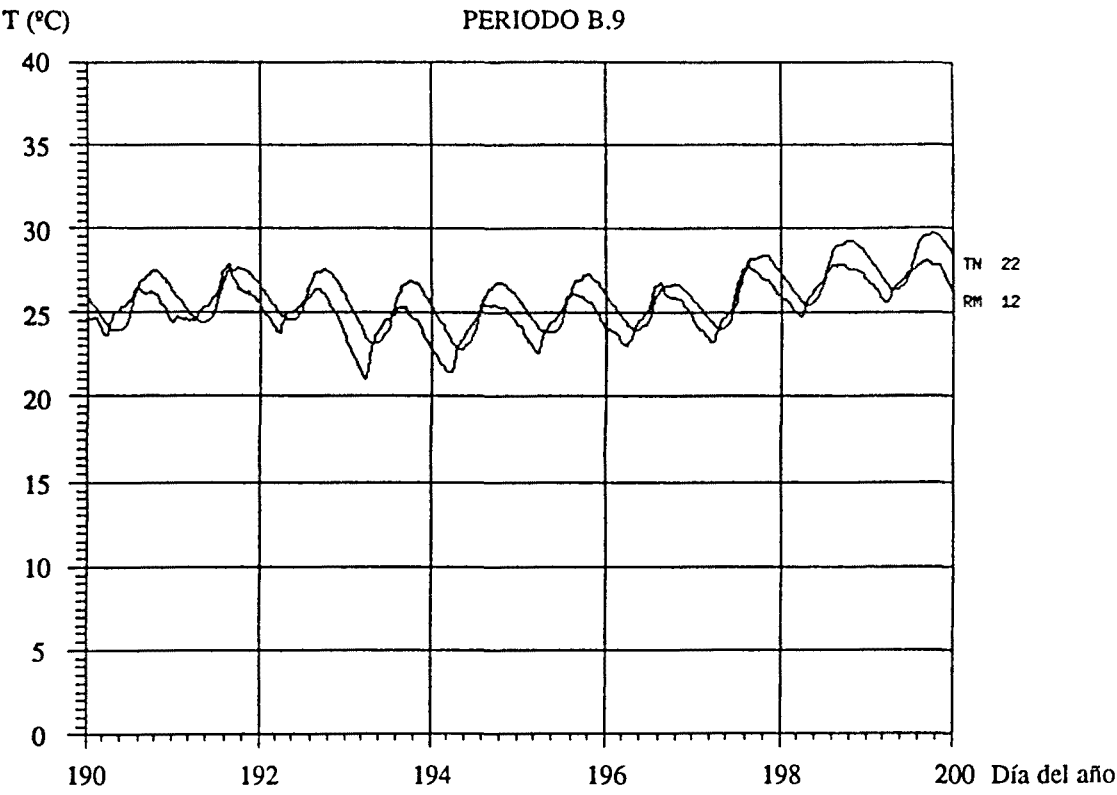


Fig.4.11e: Temperaturas registradas y simuladas en el falso techo sur (T<sub>22</sub>).

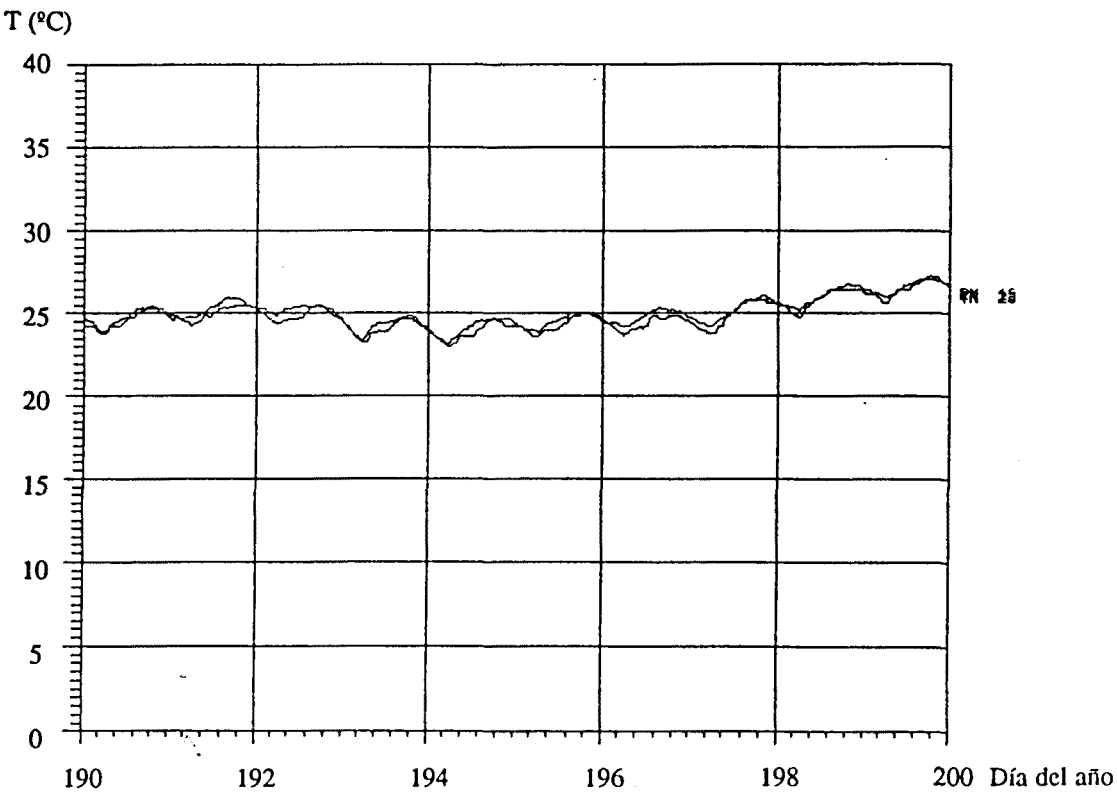


Fig.4.11f: Temperaturas registradas y simuladas en el falso techo norte (T<sub>23</sub>).

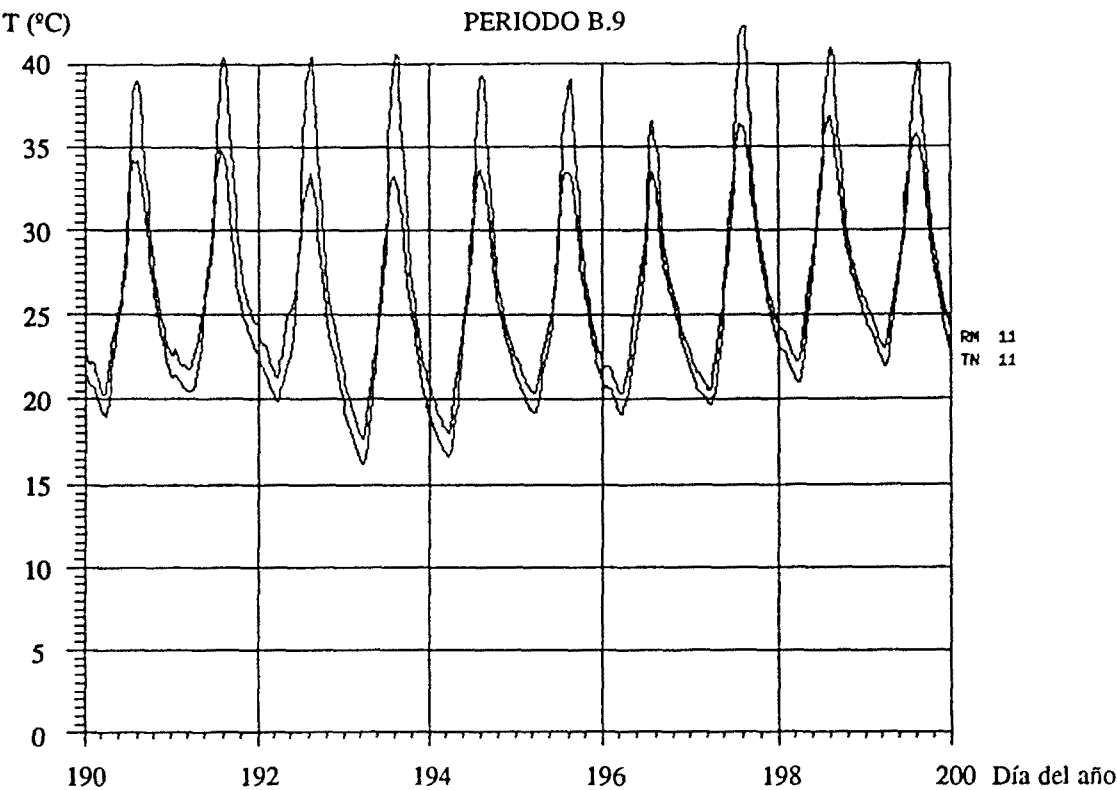


Fig.4.11g: Temperaturas registradas y simuladas en la parte inferior del Trombe ( $T_{11}$ ).

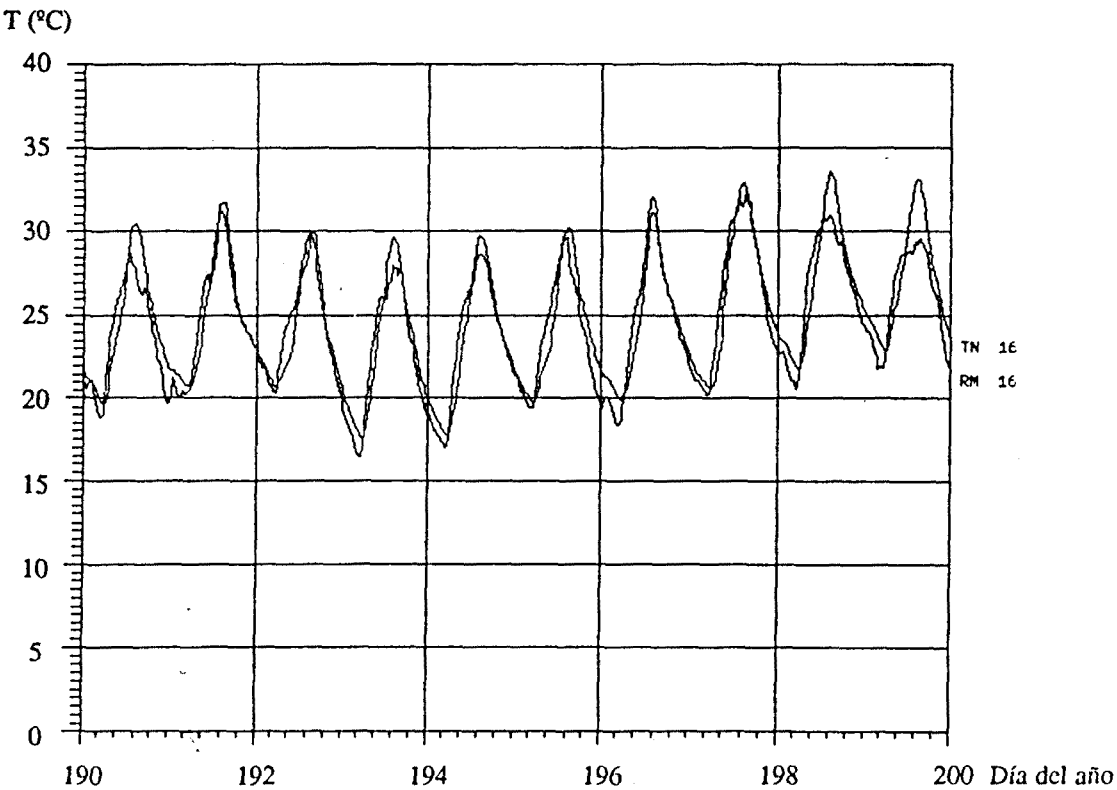


Fig.4.11h: Temperaturas registradas y simuladas en la parte superior del Trombe ( $T_{16}$ ).

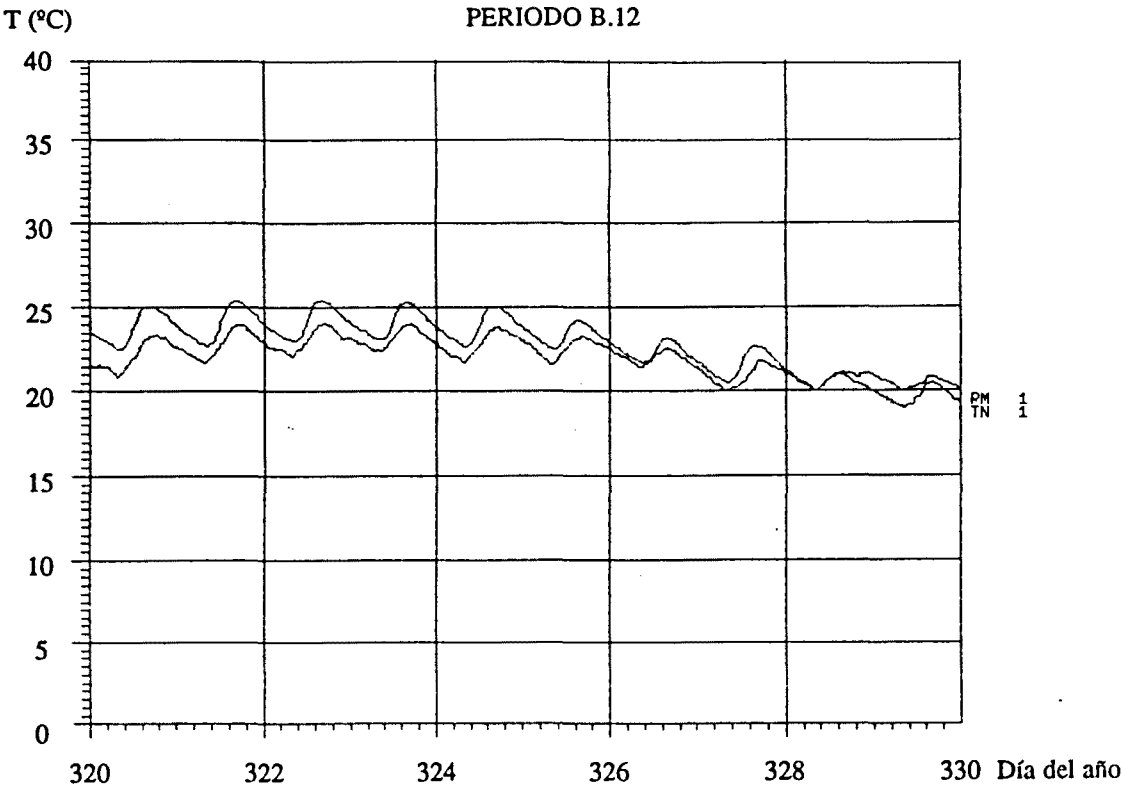


Fig.4.12a: Temperaturas registradas y simuladas en el comedor -sala de estar ( $T_1$ ).

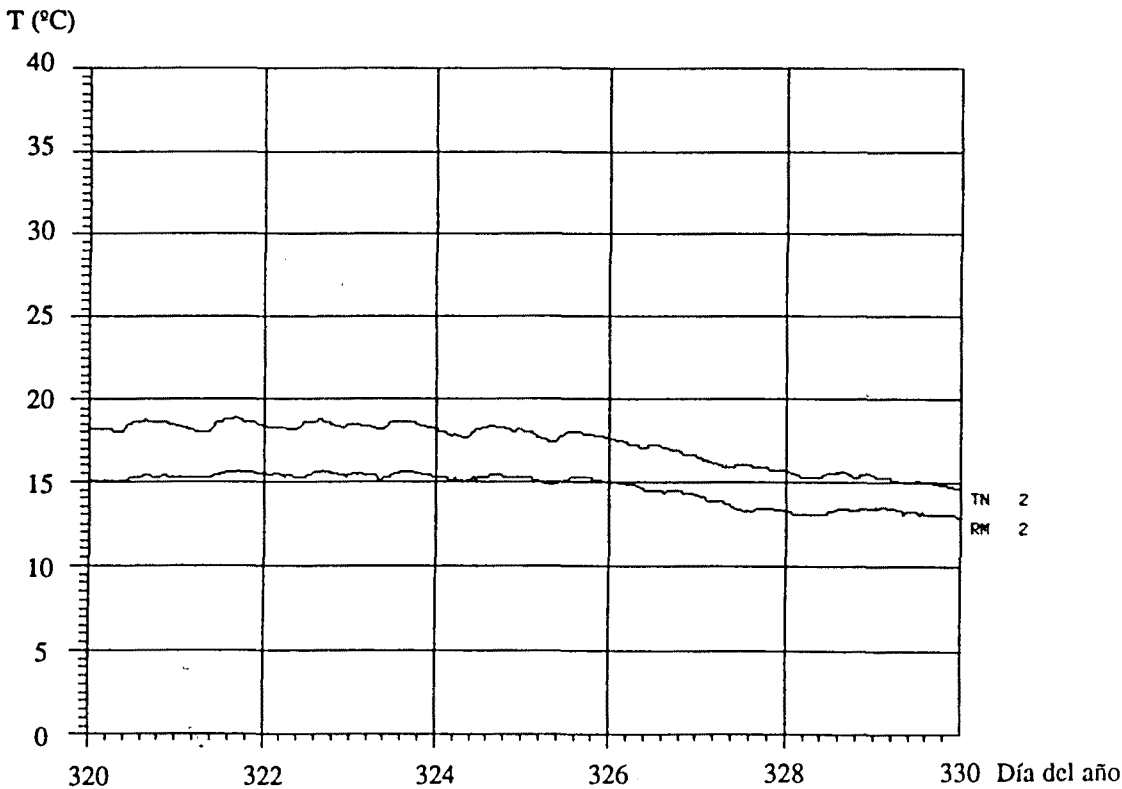
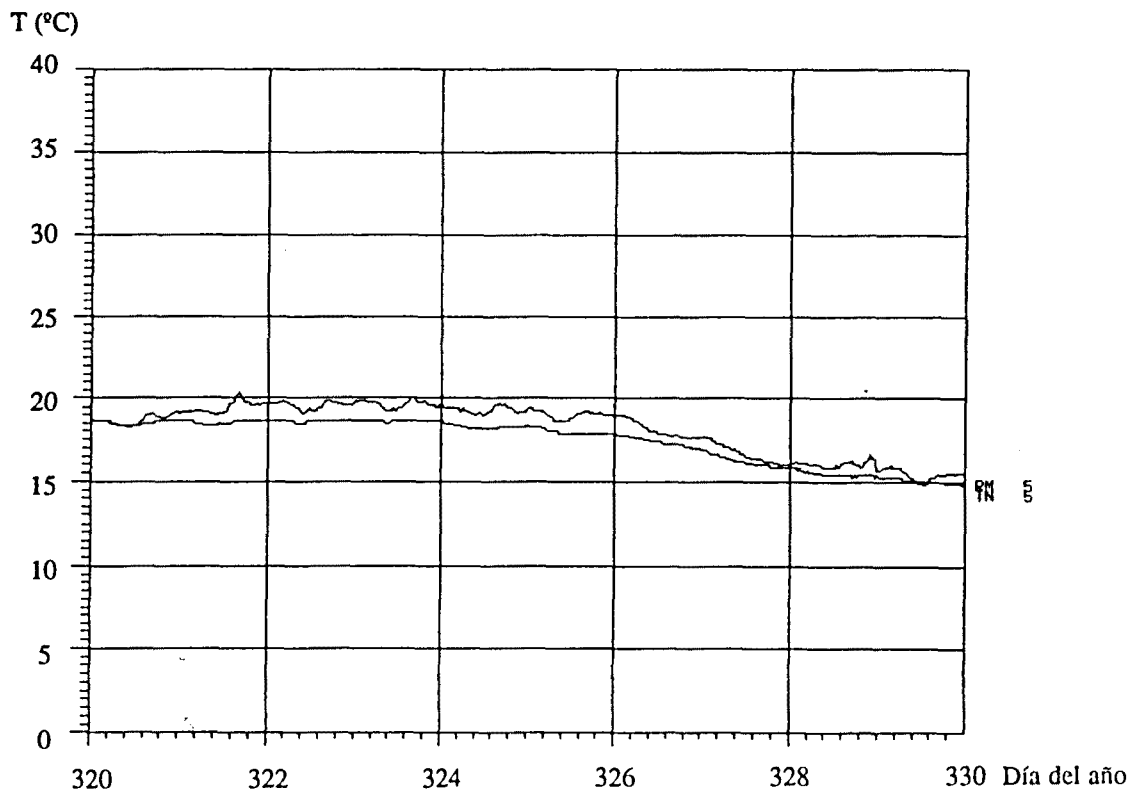
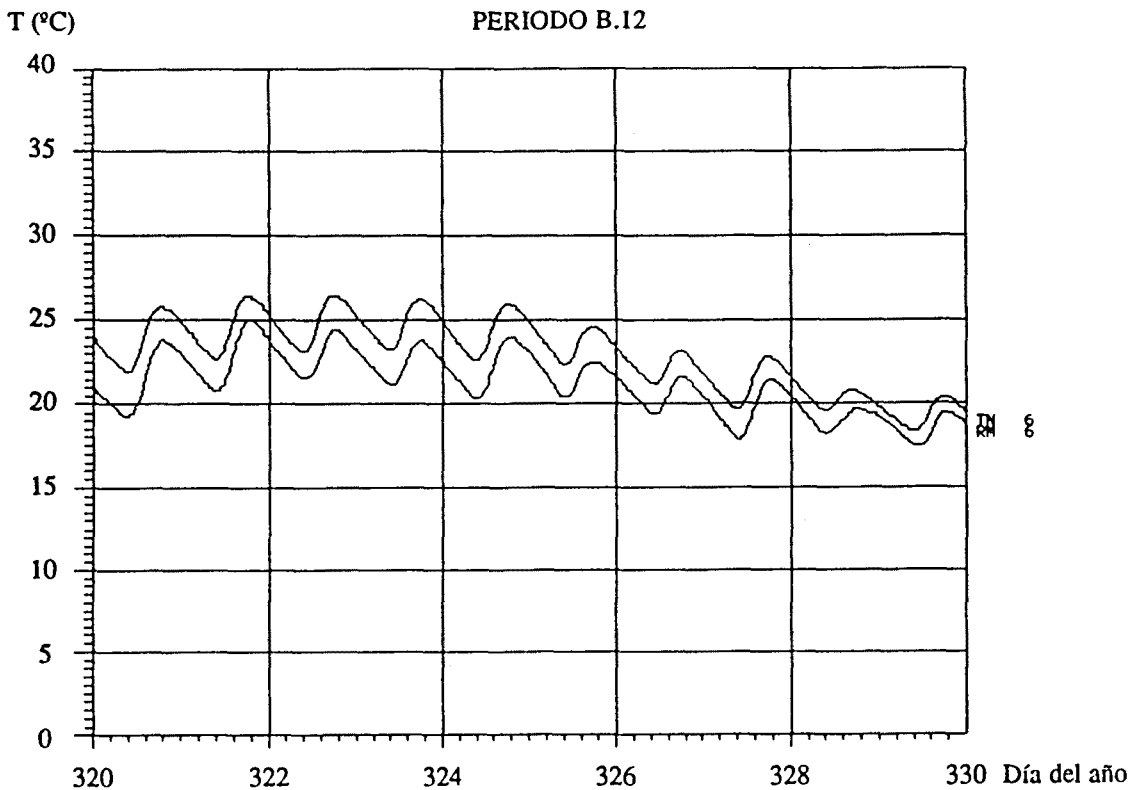


Fig.4.12b: Temperaturas registradas y simuladas en la cocina ( $T_2$ ).



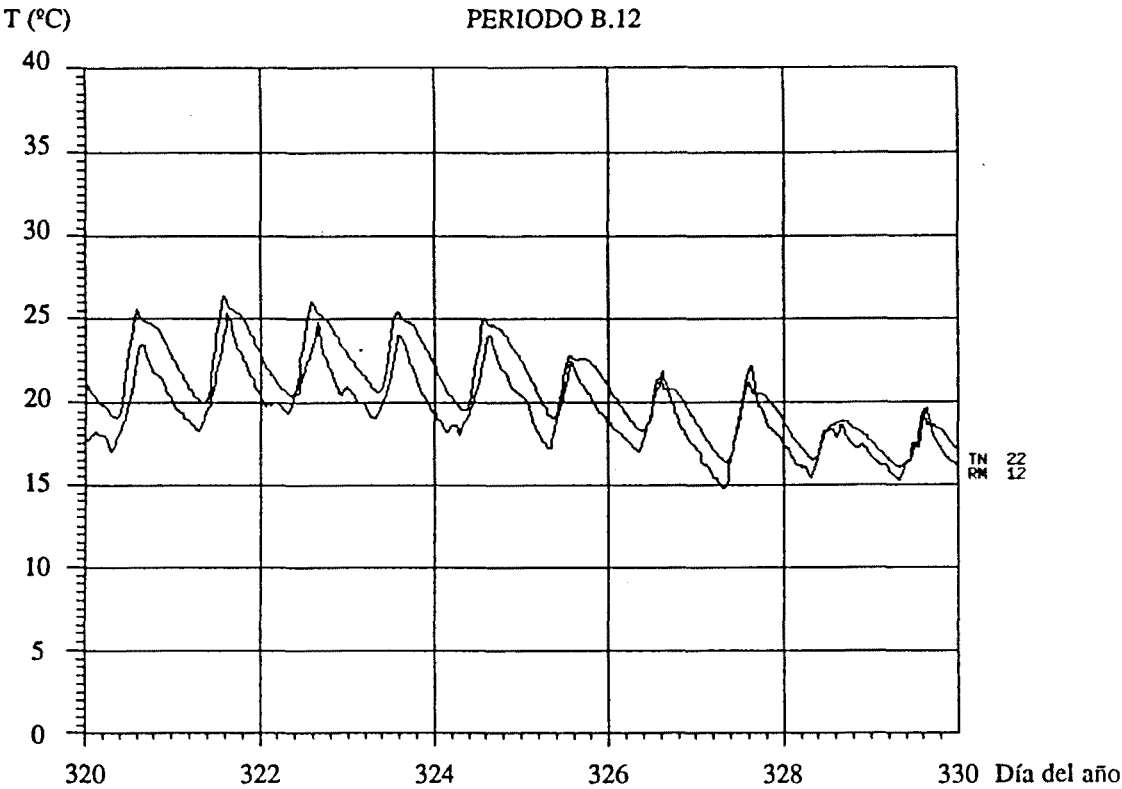


Fig.4.12e: Temperaturas registradas y simuladas en el falso techo sur (T<sub>22</sub>).

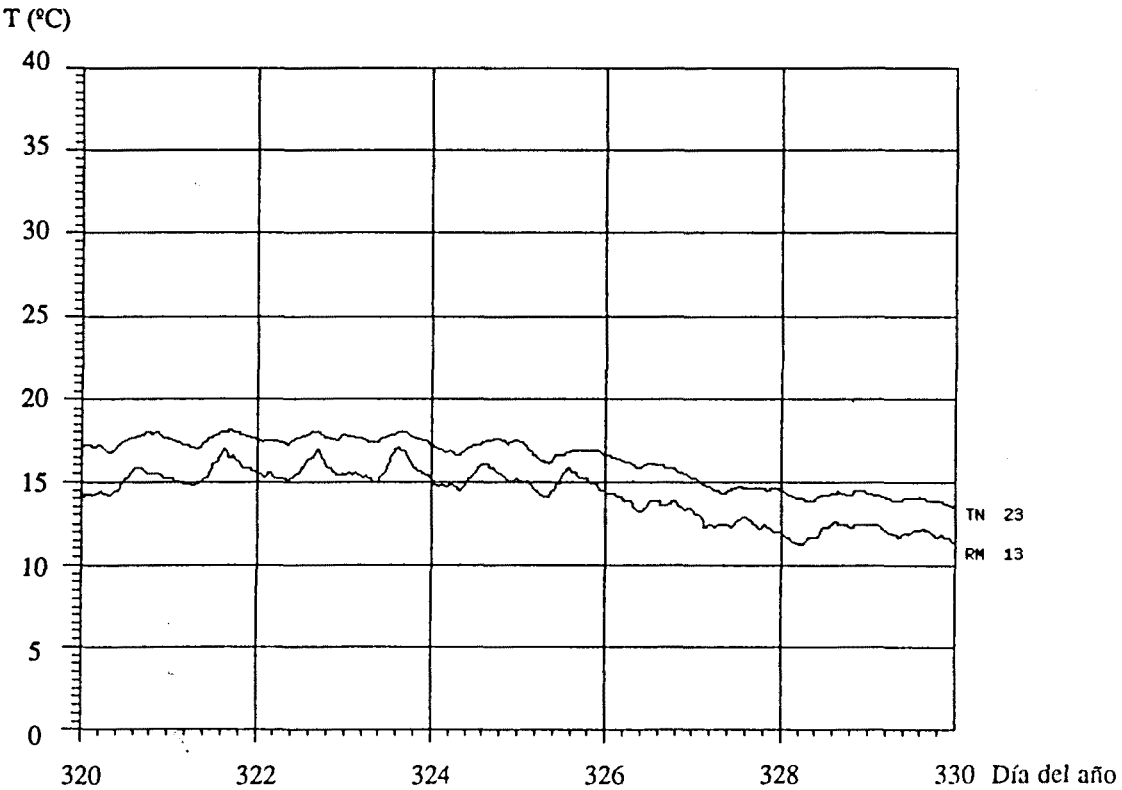


Fig.4.12f: Temperaturas registradas y simuladas en el falso techo norte (T<sub>23</sub>).



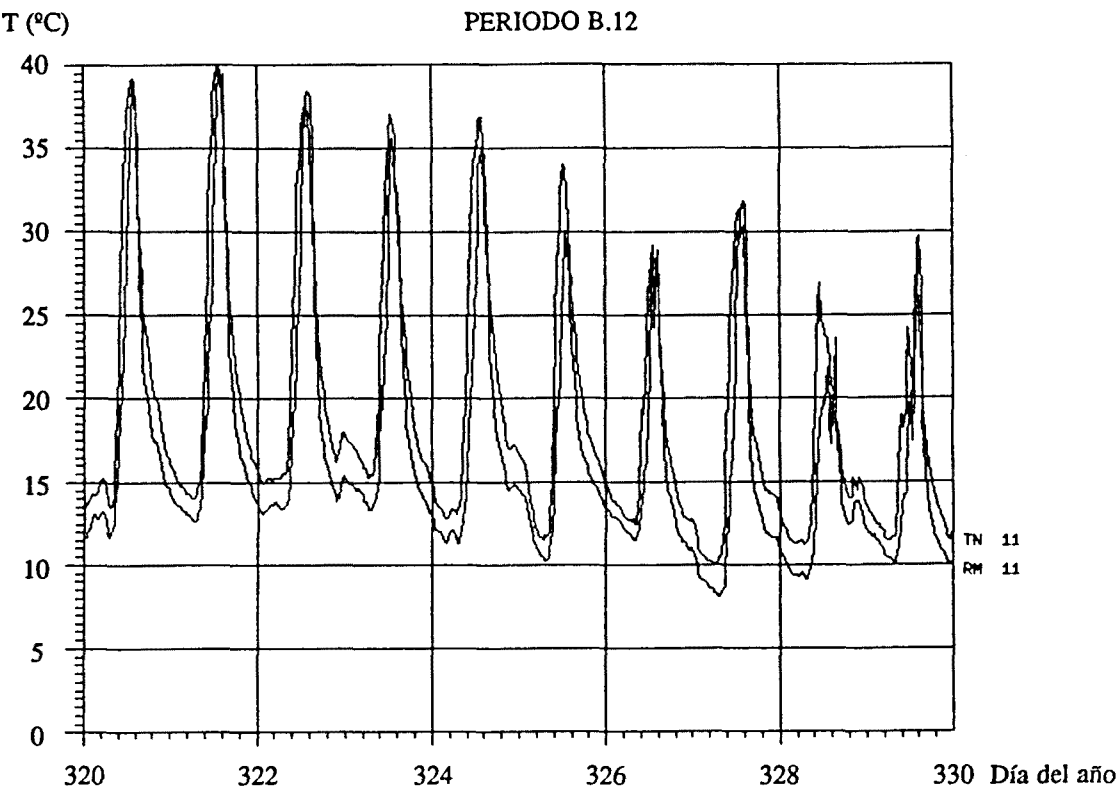


Fig.4.12g: Temperaturas registradas y simuladas en la parte inferior del Trombe ( $T_{11}$ ).

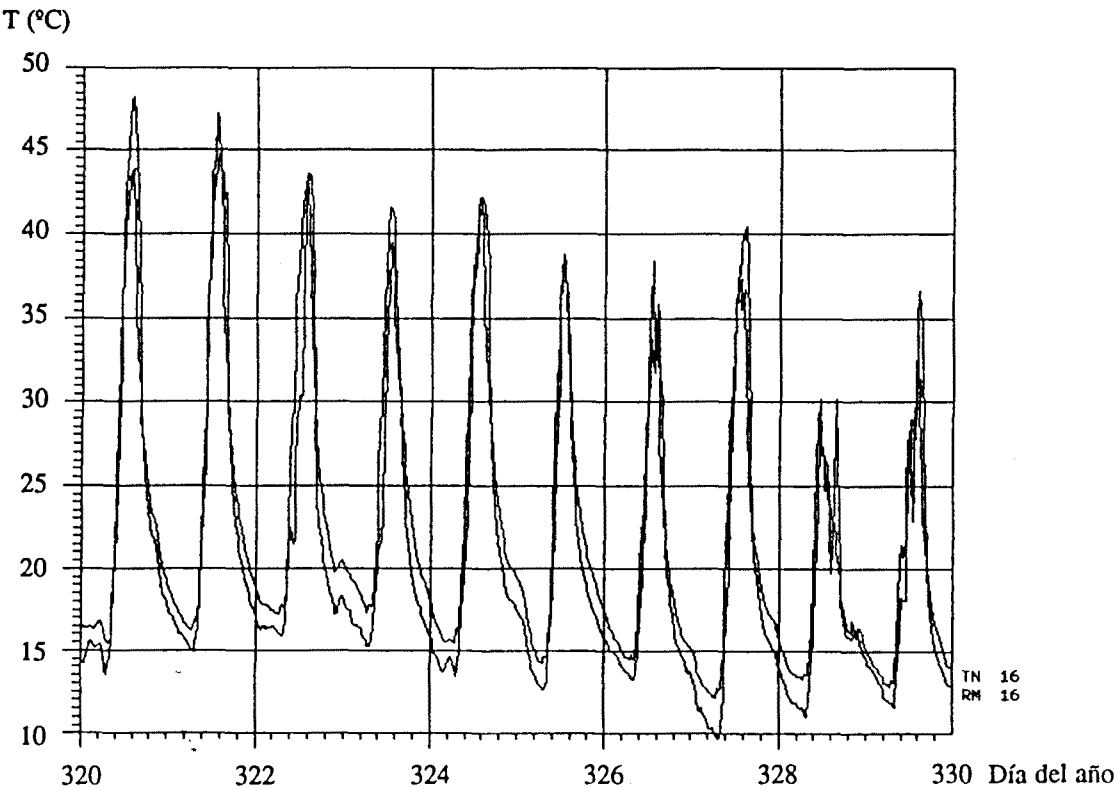


Fig.4.12h: Temperaturas registradas y simuladas en la parte superior del Trombe ( $T_{16}$ ).

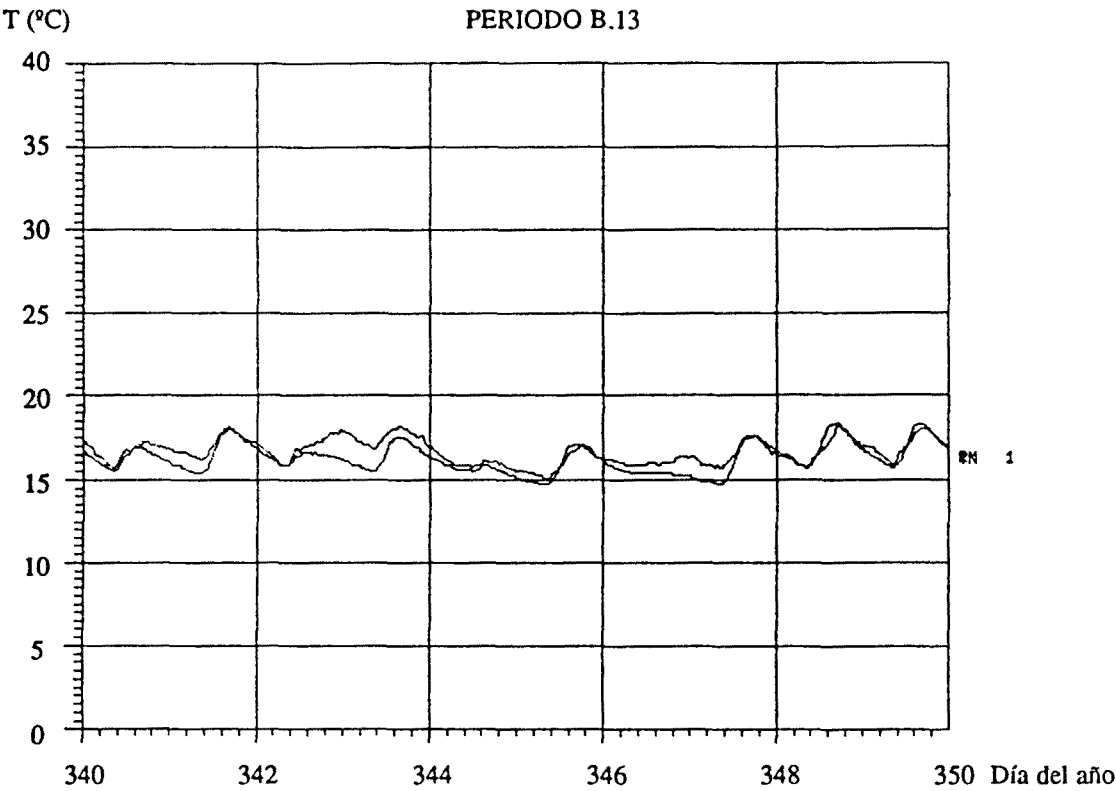


Fig.4.13a: Temperaturas registradas y simuladas en el comedor -sala de estar ( $T_1$ ).

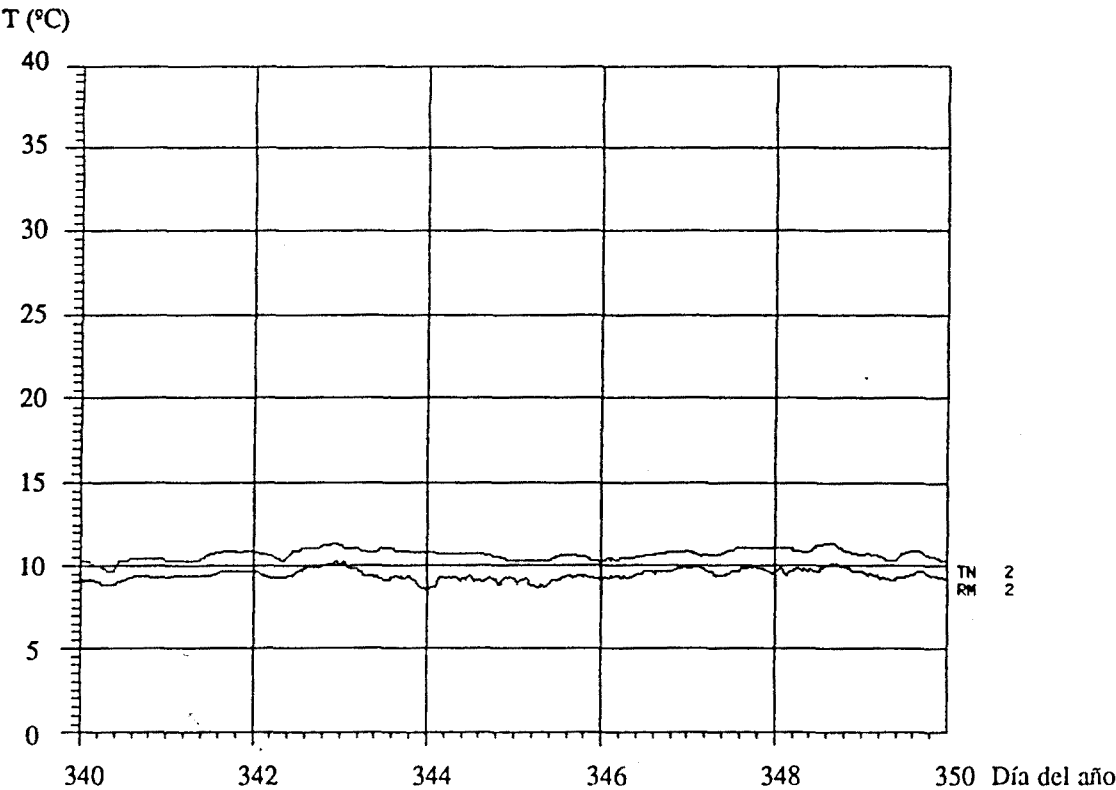


Fig.4.13b: Temperaturas registradas y simuladas en la cocina ( $T_2$ ).

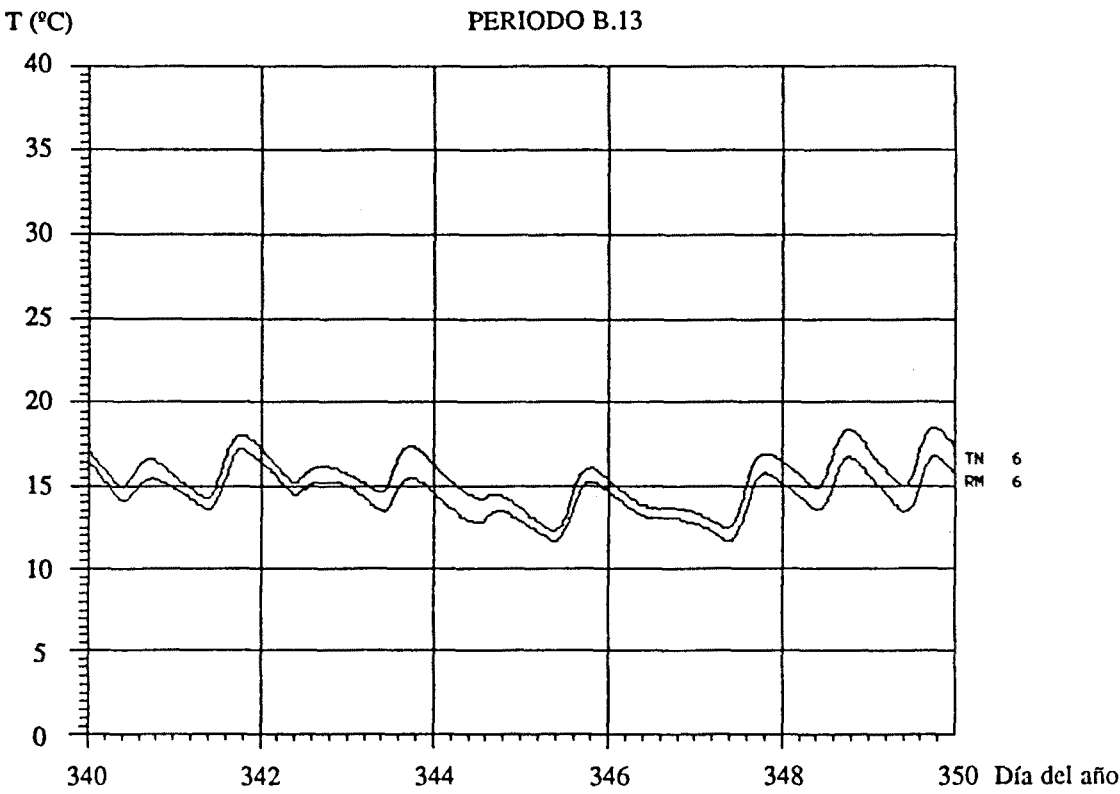


Fig.4.13c: Temperaturas registradas y simuladas en la habitación 6 ( $T_6$ ).

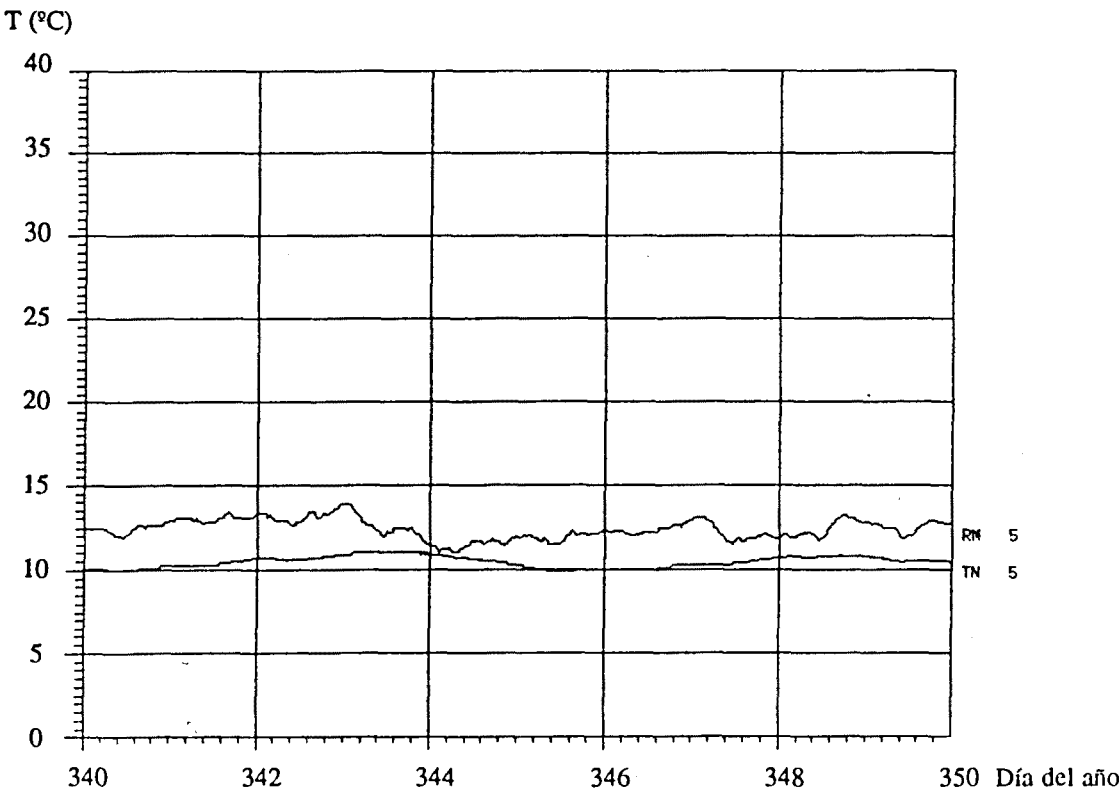


Fig.4.13d: Temperaturas registradas y simuladas en la habitación 5 ( $T_5$ ).

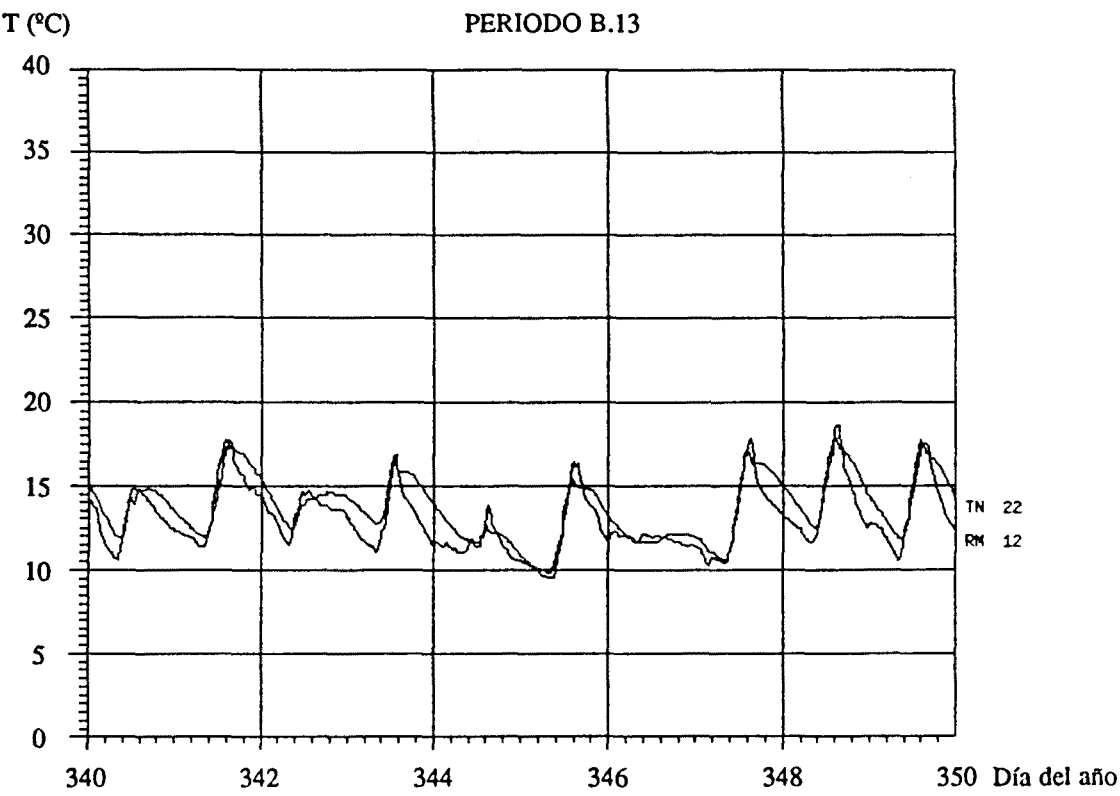


Fig.4.13e: Temperaturas registradas y simuladas en el falso techo sur (T<sub>22</sub>).

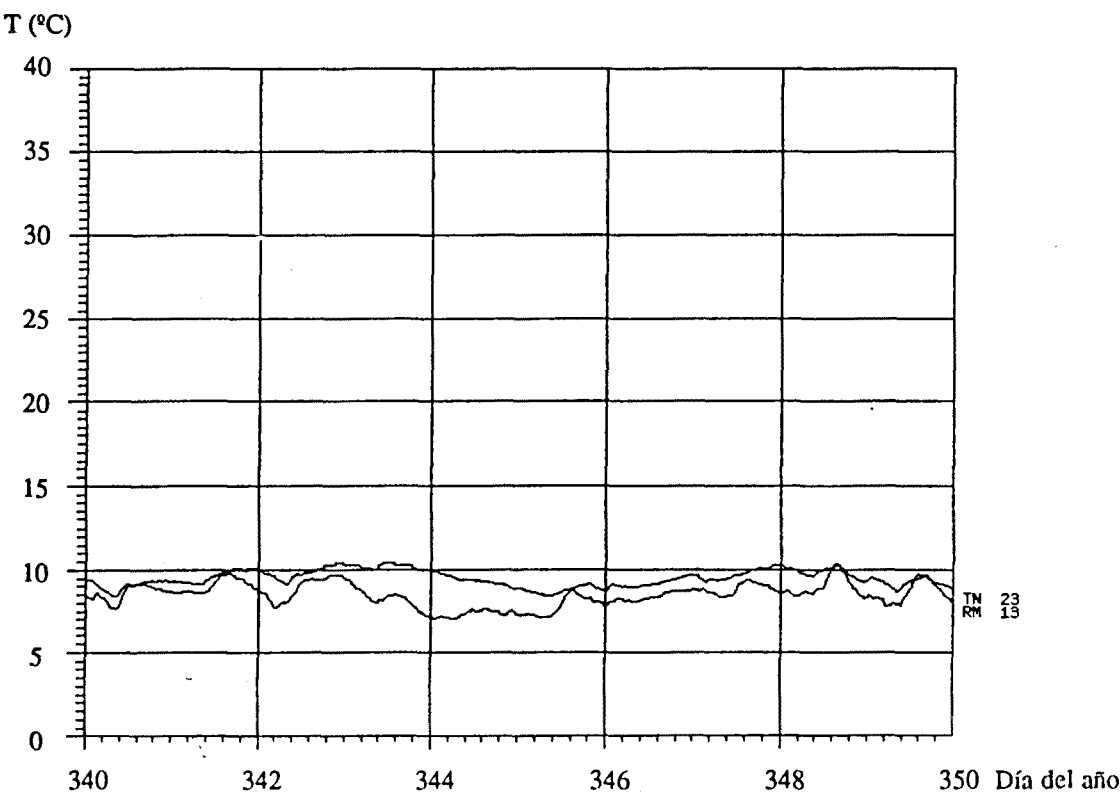


Fig.4.13f: Temperaturas registradas y simuladas en el falso techo norte (T<sub>23</sub>).

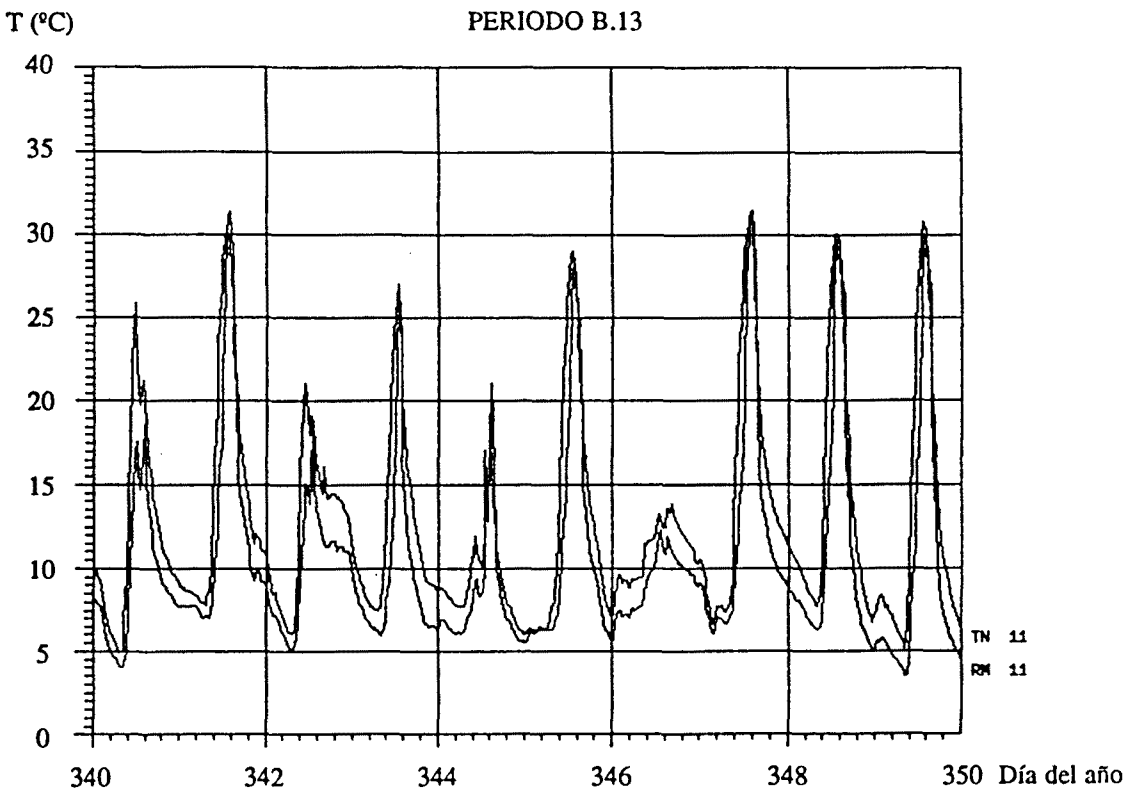


Fig.4.13g: Temperaturas registradas y simuladas en la parte inferior del Trombe ( $T_{11}$ ).

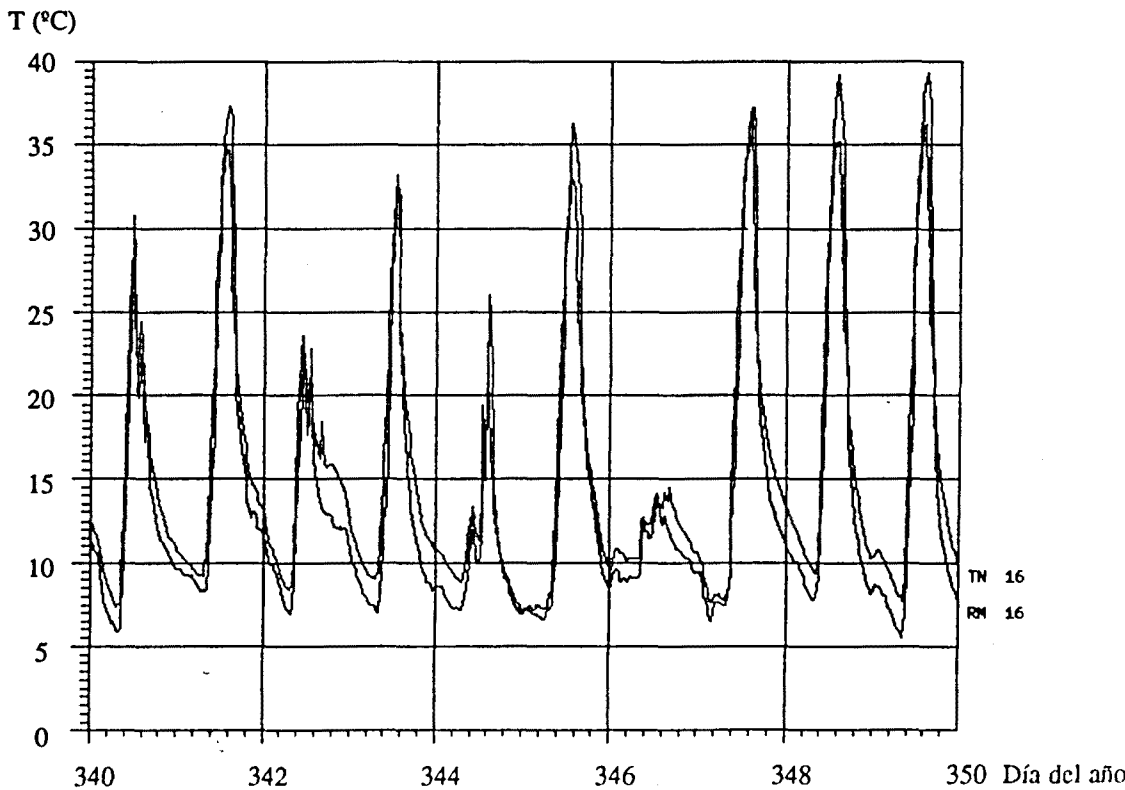


Fig.4.13h: Temperaturas registradas y simuladas en la parte superior del Trombe ( $T_{16}$ ).

#### 4.5 Estudio de sensibilidad frente a diferentes parámetros.

Para poder estudiar la influencia que distintos parámetros tiene sobre el resultado final, se ha realizado un estudio de sensibilidad, lo cual nos permitirá, también, deducir cuáles de esas variables son las más importantes de cara al diseño. En nuestro caso, sin embargo, se nos presenta un problema adicional importante, como consecuencia del gran número de variables que intervienen en la modelización térmica de un edificio (como muestra, piénsese que, sólo el fichero de definición de los datos de entrada del programa, alcanza fácilmente las mil sentencias), es por este motivo, que el estudio de sensibilidad aquí realizado, ha tenido que limitarse, necesariamente, a solamente algunas de las variables implicadas.

Para facilitar la exposición de los resultados, éstos se han agrupado por conjuntos homogéneos de variables, que son los siguientes:

- 1) número de nodos empleados en la descomposición de un elemento determinado,
- 2) parámetros que afectan directamente a la capacidad térmica de un nodo,
- 3) parámetros que afectan directamente a alguno de los enlaces por convección,
- 4) parámetros que afectan directamente a alguno de los enlaces por conducción,
- 5) propiedades radiantes de los materiales.

Antes de pasar al análisis, se planteó un pequeño estudio previo acerca del intervalo de tiempo necesario para la fiabilidad de los resultados obtenidos, así como, el tiempo de ejecución que éste lleva aparejado. En la Fig. 4.14 se presenta el tiempo de CPU empleado en la simulación realizada en un ordenador VAX 6000, en función del paso de simulación o intervalo de tiempo considerado en la modelización. Puede observarse como el tiempo de cálculo desciende exponencialmente al aumentar éste.

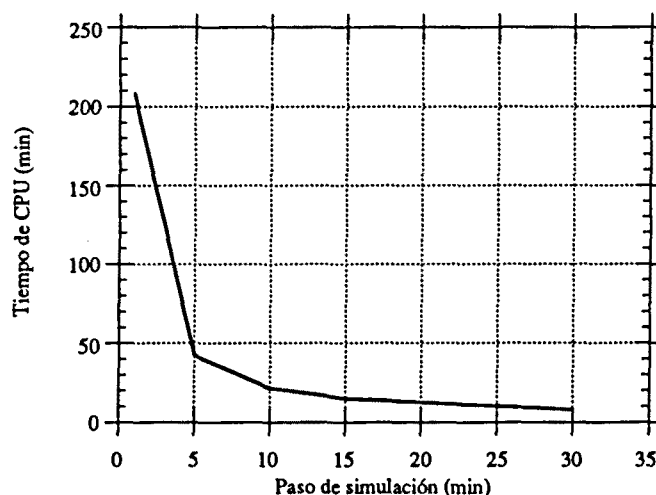


Fig. 4.14: Tiempo de ejecución en función del paso de simulación.

Así mismo, en la Tabla 4.14 se presenta el error cometido en la evaluación de las temperaturas de las distintas dependencias de la vivienda nº 15, en relación al caso de referencia, que se ha tomado aquel en el que el paso de simulación es de un minuto. Puede verse como el error se contiene con pasos de simulación de hasta 10', aumentando rápidamente

a partir de ahí<sup>1</sup>. Es por eso que, atendiendo a los dos criterios, el paso elegido para las simulaciones que realizaremos a continuación será de 10'.

En la Tabla 4.15 se presentan los resultados correspondientes a la primera parte del estudio de sensibilidad, en donde se considera la influencia que distintas modificaciones en la forma de realizar la descomposición nodal del edificio tiene en las temperaturas finales. Puede verse como la descomposición del muro Trombe en tan sólo tres nodos ya conduce a resultados correctos; incluso con dos nodos se ha encontrado, ya, que el resultado es aceptable, si no fuera porque en las temperaturas del aire del Trombe se observan desviaciones superiores a 1°C. En cambio, todo lo que son elementos de separación entre dos habitaciones con regímenes de fluctuación diferenciados (como pueden serlo los de separación entre una habitación orientada al norte y otra orientada al sur, o entre una habitación superior y otra inferior) precisan, tal como se encontró en el experimento numérico realizado en la Sección 4.2.2, de un mínimo de dos nodos si no queremos cometer errores importantes. En la última fila se ha analizado la influencia en la forma de realizar la descomposición nodal en el voladizo norte, pudiendo observarse la diferencia existente cuando éste se modeliza considerando dos nodos aislados del resto del techo o cuando se considera el superior integrado en él (nodo 41 común).

En la Tabla 4.16 pueden verse los resultados correspondientes al análisis de la influencia de la variación de la capacidad calorífica de distintos elementos de nuestra vivienda. De forma sorprendente, se ha encontrado la poca influencia que tiene este punto sobre los resultados finales, y sólo la modificación simultánea de la capacidad calorífica en todos los paramentos interiores del edificio se prevé comporte una desviación importante.

En cambio, tal como puede verse en la Tabla 4.17 la influencia en la variación de los enlaces convectivos tipo VM (convección natural entre habitaciones a través de aberturas) es considerable, así las desviaciones consideradas en los enlaces 11-99 VM y 16-99 VM encargados de la ventilación del Trombe comportan variaciones importantes, sobretudo por lo que hace referencia a la temperatura del aire del Trombe. Éste ha sido un punto crítico en la labor de contrastación de los resultados experimentales, hasta que se consiguieron establecer las razones de ventilación adecuadas. Menos importantes son las desviaciones a que conducen las variaciones en los enlaces encargados de la ventilación del falso techo y de la buhardilla.

La Tabla 4.18 permite analizar la influencia en la variación supuesta en distintos enlaces del tipo conductivo. En primer lugar puede verse la influencia significativa de la variación en la conductividad del hormigón del Trombe. En cambio, poca es la influencia de la variación en los enlaces por conducción en la puerta de entrada (enlace 85-77 GM), en la persiana de la ventana grande del comedor (enlace 30-36 GM) y en los postigos de las habitaciones del piso superior (enlace 94-79 GM). Algo más de sensibilidad puede observarse frente a variaciones en la conductividad de las tejas de hormigón del tejado (enlaces 27-29 y 26-35 GM), elemento especialmente conflictivo en el trabajo de contrastación debido al espacio vacío que queda entre las tejas y por donde se producen unas infiltraciones de difícil evaluación. Son especialmente sensibles los enlaces por conducción a través del techo (enlaces 20-43, 21-41 y 34-41 GM), del suelo (enlaces 28-99, 31-99 y 32-99 GM) y algo menos a través de la pared norte (enlaces 60-61, 62-63 y 64-65 GM). Especialmente significativa es la influencia de la variación en los enlaces conductivos a través de los tabiques de separación entre las habitaciones sur y las norte (enlaces 49-69, 50-47, 54-84 y 58-81 GM), efecto que ya ha sido observado en la Tabla 4.15. También es notable la sensibilidad del enlace establecido para modelizar la influencia del efecto de aleta en el voladizo sur (enlaces 20-99 y 43-99 GM) y que cabe situar dentro de la consideración del puente térmico formado por éste.

---

<sup>1</sup> Teniendo en cuenta que estamos tratando con temperaturas medias, se ha adoptado como criterio de bondad de una simulación aquella que comporta desviaciones iguales o inferiores a 0.1°C en todas las temperaturas consideradas.

Por último en la Tabla 4.19 se ha analizado la influencia de la variación de la absorptividad solar de distintos elementos de la fachada sur. En este caso puede verse el efecto notable de la variación de ésta en el caso de la pared del muro Trombe o del tejado, viéndose la importancia de una adecuada definición de este valor por medios experimentales.



Tabla 4.14: Error cometido en las temperaturas de las habitaciones en función del paso de simulación.

Paso de simulación	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T11	T16	T22	T23	T25	T73
1'	15.9	10.1	12.9	12.3	9.6	14.5	14.7	10.5	11.1	12.2	14.2	12.6	8.4	4.8	6.8
	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_3$	$\Delta T_4$	$\Delta T_5$	$\Delta T_6$	$\Delta T_7$	$\Delta T_8$	$\Delta T_9$	$\Delta T_{11}$	$\Delta T_{16}$	$\Delta T_{22}$	$\Delta T_{23}$	$\Delta T_{25}$	$\Delta T_{73}$
5'	0	0	0	0	0	+ 0.1	0	+ 0.1	+ 0.1	+ 0.1	0	+ 0.1	+ 0.1	+ 0.1	0
10'	0	+ 0.1	0	0	+ 0.1	+ 0.1	+ 0.1	+ 0.1	+ 0.1	+ 0.1	0	+ 0.1	+ 0.2	+ 0.3	+ 0.2
15'	+ 0.4	+ 0.6	+ 0.6	+ 0.6	+ 1	+ 1.1	+ 1.1	+ 1.1	+ 1	+ 0.7	+ 1.1	+ 1.3	+ 1.2	+ 1.9	+ 1.5
30'	+ 0.4	+ 0.6	+ 0.5	+ 0.5	+ 0.8	+ 1	+ 0.9	+ 0.9	+ 0.9	+ 0.6	+ 0.9	+ 1.1	+ 1.1	+ 1.7	+ 1.3

Tabla 4.15: Influencia de la descomposición nodal sobre las temperaturas de las habitaciones.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T11	T16	T22	T23	T25	T73
Caso de referencia	15.9	10.1	12.9	12.3	9.6	14.5	14.7	10.5	11.1	12.2	14.2	12.6	8.4	4.8	6.8
	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_3$	$\Delta T_4$	$\Delta T_5$	$\Delta T_6$	$\Delta T_7$	$\Delta T_8$	$\Delta T_9$	$\Delta T_{11}$	$\Delta T_{16}$	$\Delta T_{22}$	$\Delta T_{23}$	$\Delta T_{25}$	$\Delta T_{73}$
Con 10 nodos en muro Trombe inf. en vez de 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Con 3 nodos en muro Trombe inf. en vez de 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eliminando nodo 69	- 0.3	+ 1	+ 0.2	+ 0.1	+ 0.3	0	0	+ 0.2	+ 0.1	0	0	0	+ 0.1	0	0
Eliminando nodo 47	- 0.1	+ 0.1	+ 0.2	+ 0.5	+ 0.1	0	0	+ 0.1	+ 0.1	0	0	0	0	0	0
Eliminando nodos 39 y 87	- 0.2	+ 0.1	+ 0.1	0	+ 0.3	+ 0.2	+ 0.3	+ 0.6	+ 0.2	0	0	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.1	+ 0.1
Eliminando nodos 81 y 84	0	+ 0.2	+ 0.2	+ 0.1	+ 0.4	- 0.5	- 0.4	+ 0.6	+ 0.4	0	- 0.1	- 0.2	+ 0.3	+ 0.1	+ 0.1
Desdoblado nodos 56 y 57	0	0	0	0	0	0	0	+ 0.1	+ 0.1	0	0	0	0	0	0
Desdoblado nodos 51, 52, 46, 48, 56 y 57	0	0	0	0	0	0	0	0	- 0.1	0	0	0	0	0	0
Desdoblado 41 sobre 34	0	0	+ 0.1	+ 0.1	+ 0.2	0	+ 0.1	+ 0.2	+ 0.2	0	0	+ 0.1	+ 0.2	0	+ 0.1

Tabla 4.16: Influencia de la variación de la capacidad calorífica sobre las temperaturas de las habitaciones.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T11	T16	T22	T23	T25	T73
Caso de referencia	15.9	10.1	12.9	12.3	9.6	14.5	14.7	10.5	11.1	12.2	14.2	12.6	8.4	4.8	6.8
	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_3$	$\Delta T_4$	$\Delta T_5$	$\Delta T_6$	$\Delta T_7$	$\Delta T_8$	$\Delta T_9$	$\Delta T_{11}$	$\Delta T_{16}$	$\Delta T_{22}$	$\Delta T_{23}$	$\Delta T_{25}$	$\Delta T_{73}$
Multiplicando C muro Trombe inf. por 1.4	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	+0.1	0	0	0	0	0
Multiplicando C muro Trombe inf. por 0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	-0.2	0	0	0	0
Multiplicando C muros laterales por 2	-0.1	0	0	-0.1	0	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Multiplicando C muros laterales por 0.5	0	+0.1	+0.1	0	+0.1	0	0	+0.1	0	0	0	0	0	0	0
Multiplicando C forjados piso por 2	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Multiplicando C forjados piso por 0.5	0	+0.1	0	0	+0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Multiplicando C aire hab. 1 por 1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Multiplicando C aire hab. 1 por 0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.17: Influencia de la variación de los enlaces convectivos tipo VM sobre las temperaturas de las habitaciones.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T11	T16	T22	T23	T25	T73
Caso de referencia	15.9	10.1	12.9	12.3	9.6	14.5	14.7	10.5	11.1	12.2	14.2	12.6	8.4	4.8	6.8
	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_3$	$\Delta T_4$	$\Delta T_5$	$\Delta T_6$	$\Delta T_7$	$\Delta T_8$	$\Delta T_9$	$\Delta T_{11}$	$\Delta T_{16}$	$\Delta T_{22}$	$\Delta T_{23}$	$\Delta T_{25}$	$\Delta T_{73}$
Variando enlace 11-99 VM de 15 a 5	+0.3	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	2.5	0	+0.1	+0.1	0	0
Variando enlace 16-99 VM de 5 a 0	0	0	+0.1	+0.1	+0.2	+0.5	+0.5	+0.2	+0.2	0	+2	+0.6	+0.1	0	+0.1
Idem 16-22 y 23-99 VM de 3.2 a 4.5	-0.1	-0.1	0	0	0	0	0	0	-0.1	0	-0.1	+0.1	-0.2	0	0
Idem 25-99 y 73-99 VM de 20 a 10	0	0	+0.1	0	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	0	0	+0.2	+0.1	+0.2	+0.6



Tabla 4.19: Influencia de la variación de las propiedades radiantes sobre las temperaturas de las habitaciones.

	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>16</sub>	T <sub>22</sub>	T <sub>23</sub>	T <sub>25</sub>	T <sub>73</sub>
Caso de referencia	15.9	10.1	12.9	12.3	9.6	14.5	14.7	10.5	11.1	12.2	14.2	12.6	8.4	4.8	6.8
	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_3$	$\Delta T_4$	$\Delta T_5$	$\Delta T_6$	$\Delta T_7$	$\Delta T_8$	$\Delta T_9$	$\Delta T_{11}$	$\Delta T_{16}$	$\Delta T_{22}$	$\Delta T_{23}$	$\Delta T_{25}$	$\Delta T_{73}$
Variando $\alpha$ Trombe (12 y 17) de 0.95 a 0.85	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	-0.6	-0.6	-0.2	-0.3	-0.4	-0.8	-0.5	-0.2	0	-0.1
Variando $\alpha$ puerta (nodo 77) de 0.75 a 0.65	-0.1	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	-0.1	0	0	0	0	0
Variando $\alpha$ persiana (nodo 36) de 0.2 a 0.3	0	0	0	0	+0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variando $\alpha$ postigos (71 y 79) de 0.4 a 0.5	0	0	0	0	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	0	0	+0.1	+0.1	0	0	0
Variando $\alpha$ tejado (nodos 29 y 35) de 0.5 a 0.6	0	0	+0.1	+0.1	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2	+0.2	0	+0.1	+0.3	+0.2	+0.4	+0.4

#### 4.6 Resultados de la modelización: Balances energéticos.

Partiendo de la base de que el modelo propuesto para describir el comportamiento térmico de la casa nº 15 sea correcto (lo cual creemos aproximadamente cierto, según se desprende de los resultados presentados en la Sección 4.4), la misma modelización nos permite realizar ahora un trabajo de simulación y/o diseño del edificio considerado. Es lo que haremos en el próximo Capítulo. Sin embargo, antes, y en aras de una comprensión global del comportamiento térmico del edificio considerado, se ha creído interesante presentar el resultado de su balance energético.

En la Fig.4.15 se muestra el volumen de control elegido para ello, así como los flujos caloríficos que lo atraviesan, y que fueron integrados a lo largo del periodo de tiempo considerado. Los resultados para el caso que estamos considerando, con la casa deshabitada y las persianas y postigos cerrados, sin empleo de energía auxiliar, se presentan en la Tabla 4.20 para un periodo invernal (el B.13) y en la Tabla 4.22 para un periodo estival (el B.9).

##### 4.6.1 Balance energético en un periodo invernal.

Como puede verse en la Tabla 4.20, las ganancias en el periodo invernal suponen un valor de 824 MJ, de las cuales un 10.5% son ganancias internas debidas al equipo de seguimiento, mientras que el resto lo son básicamente de origen solar por la fachada sur obtenidas por ganancias directas (a través de la ventana situada en la parte superior de la puerta de entrada) o por ganancias indirectas (a través del muro de hormigón del Trombe y de la puerta y ventanas cerradas). Las pérdidas para el mismo periodo totalizan un valor de 802 MJ, de las cuales un 10,7 % tienen lugar a través de la fachada sur, un 12,5 % a través de la fachada norte, un 20 % son pérdidas por el suelo, un 42.7 % lo son por el techo, un 7 % son debidas a las infiltraciones y un 6.7 % lo son a causa del puente térmico formado por el voladizo situado en la fachada sur. La diferencia de 22 MJ entre el calor ganado y el perdido corresponde a la energía almacenada en la estructura del edificio.

Hay que advertir que hemos creído interesante, a diferencia del modelo utilizado para la contrastación presentado en la Sección 4.4, no considerar aquí la existencia de flujo calorífico a través de los muros laterales de separación entre las casas, a fin de no tener otras fuentes de calor que las de la propia casa, que nos disfrazarían el resultado final. Esta hipótesis, totalmente lógica, sería el resultado de suponer que todas las casas se encontraran en régimen de fluctuación libre sin empleo de energía auxiliar, ya que entonces, las condiciones térmicas interiores serían las mismas en todas ellas, y por tanto, no se presentarían intercambios energéticos a través de las paredes medianeras.

En la Tabla 4.21 se presentan los mismos resultados pero en forma resumida y agrupándolos por tipos de cerramientos. De su análisis se desprende como las pérdidas a través de las ventanas son relativamente pequeñas en relación al total, lo cual es debido, en parte, al hecho de encontrarse éstas cerradas, pero también creemos que es indicativo de la bondad de su construcción. La misma razón nos serviría para justificar la también pequeña magnitud de las infiltraciones. En cambio, creemos que son excesivamente grandes las pérdidas por el techo, lo cual podría justificarse por el hecho de encontrarse totalmente deteriorado el aislamiento que originalmente ahí se había dispuesto. Creemos, también, significativas las pérdidas debidas al voladizo de la fachada sur. Para una mayor claridad, en la Fig.4.16 aparecen representados en forma de diagrama de barras los mismos resultados.

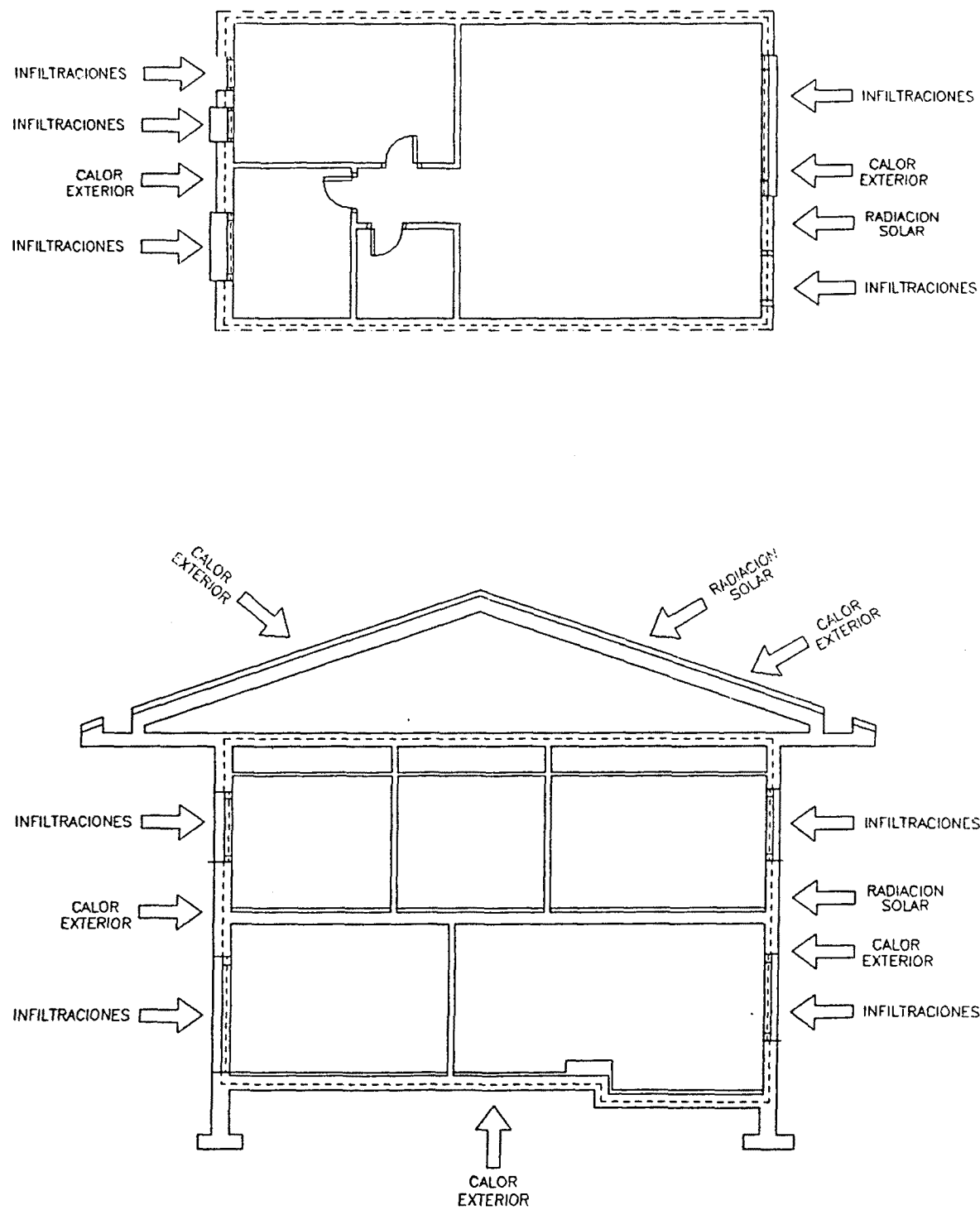


Fig.4.15: Volumen de control elegido y flujos caloríficos en la casa nº 15.

**Tabla 4.20:** Intercambios caloríficos entre distintos elementos de la casa nº 15 y el exterior, en el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

Elemento	Intercambio	Q saliente	Q entrante	Q sal. total	Q ent. total	Q total
Muro Trombe inferior	85-77 GM	9.09	27.52			
	82-53 GM	22.07	7.16			
	90-30 GM	28.47	3.64			
	90 EM	-	-	-61.91 (7.72)	+280.14 (33.98)	+218.23
	28 EM	-	39.32			
	1 EM	-	-			
	14-76 GM	2.28	202.5			
Muro Trombe superior	19-18 GM	0.62	317.5			
	79-71 GM	23	1.33			
	79 EM	-	16.66	-23.62 (2.94)	+417.3 (50.63)	+393.68
	94 EM	-	81.81			
	39 EM	-	-			
	6 EM	-	-			
	7 EM	-	-			
Pared norte	92-97 GM	3.46	-			
	93-68 GM	5.71	-			
	91-89 GM	29.09	0.31	-100.70 (12.55)	+0.31 (0.04)	-100.39
	60-61 GM	11.19	-			
	62-63 GM	16.69	-			
	64-65 GM	34.56	-			
Suelo	28-99 GM	38.63	-	-162.78 (20.29)	+8.03 (0.97)	-154.75
	31-99 GM	65.80	2.49			
	32-99 GM	58.35	5.54			
Techo	20-43 GM	222.6	-	-342.2 (42.66)	-	-342.2
	21-41 GM	119.6	-			
Infiltraciones	1-11 GM	9.36	4.33			
	2-99 GM	3.20	0.13			
	3-99 GM	3.10	-			
	5-99 GM	4.68	0.22	-57.28 (7.14)	+31.22 (3.79)	-26.06
	6-16 GM	1.97	1.42			
	7-16 GM	1.53	1.03			
	22-16 GM	6.77	22.60			
	23-99 GM	26.67	1.49			
Puente térmico	20-99 GM	53.57	0.86	-53.57 (6.68)	+0.86 (0.10)	-52.71
Ganancias internas	3 EM	-	86.4	-	+86.4 (10.48)	+86.4
Total				-802.06	+824.26	+22.2

Los flujos caloríficos vienen expresados en MJ, con GM indican intercambios conductivos y con EM representan radiación solar incidente, mientras que los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

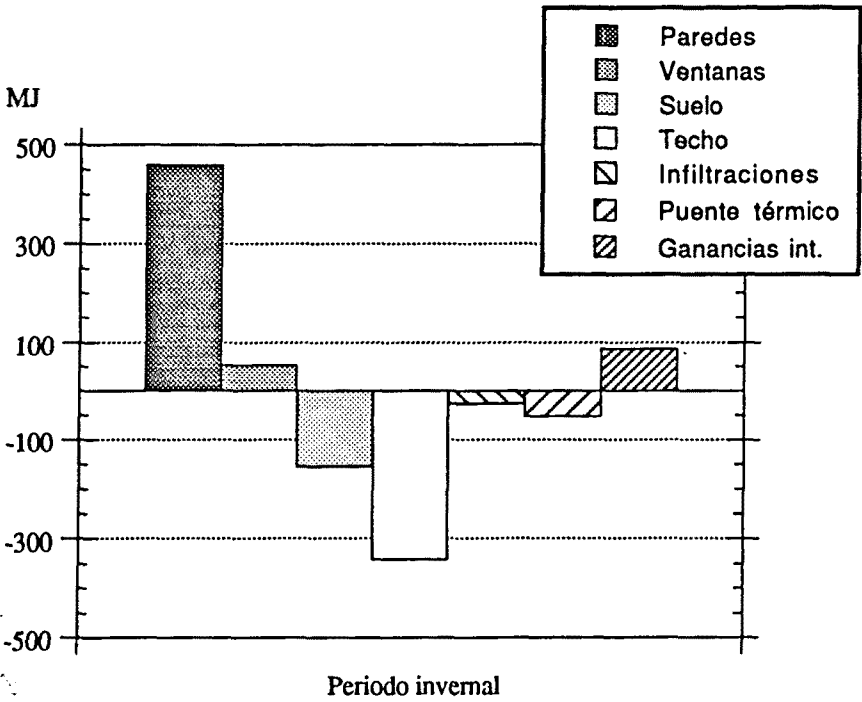
#### 4.6.2 Balance energético en un periodo estival.

De los resultados presentados en la Tabla 4.22 correspondientes al periodo estival, puede verse como el calor ganado es de 547 MJ, un 43.7% del cual lo es a través de la fachada sur por ganancias directas e indirectas y un 27.7% a través del techo, suponiendo las ganancias internas debidas al equipo de seguimiento un valor del 15.8%. Mientras que las pérdidas para el mismo periodo totalizan un valor de 431 MJ, de las cuales un 25.8% se producen a través

**Tabla 4.21 :** Resultados del balance térmico global de la casa nº 15 en el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-96.50 (12.03)	+554.68 (67.29)	+458.18
Ventanas	-89.73 (11.19)	+143.07 (17.36)	+53.34
Suelo	-162.78 (20.29)	+8.03 (0.97)	-154.75
Techo	-342.2 (42.66)	-	-342.2
Infiltraciones	-57.28 (7.14)	+31.22 (3.79)	-26.06
Puente térmico	-53.57 (6.68)	+0.86 (0.1)	-52.71
Ganancias internas	-	+86.4 (10.48)	+86.4
Total	-802.06	+824.26	+22.2

Los flujos vienen expresados en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.



**Fig.4.16:** Representación de los resultados del balance térmico global de la casa nº 15, en el periodo comprendido entre los días 340 y 350.



del suelo, un 18.6% a través de la fachada sur, un 17.8% son pérdidas por el techo, un 16.2% se pierde por la fachada norte, un 12.2% son debidas a las infiltraciones y un 9.4% al voladizo de la fachada sur. La diferencia de 116 MJ a favor del calor ganado, corresponde a energía térmica acumulada en la estructura del edificio durante ese periodo.

**Tabla 4.22:** Intercambios caloríficos entre distintos elementos de la casa nº 15 y el exterior, para el periodo comprendido entre los días 190 y 200.

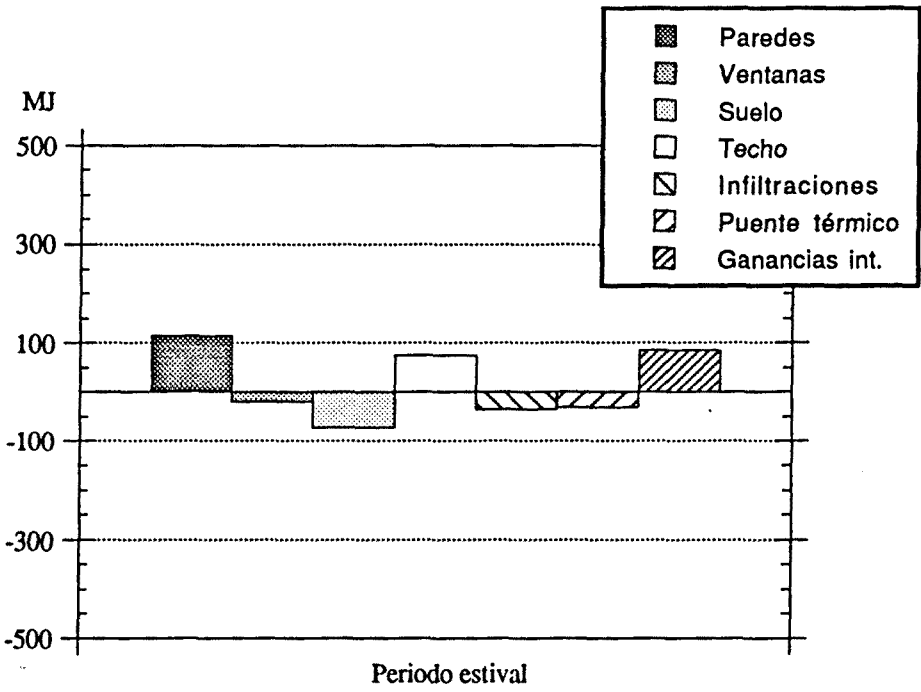
Elemento	Intercambio	Q saliente	Q entrante	Q sal. total	Q ent. total	Q total
Muro Trombe inferior	85-77 GM	7.94	17.55	-45.93 (10.65)	+152.88 (27.91)	+106.95
	82-53 GM	15.51	8.18			
	90-30 GM	17.92	5.57			
	90 EM	-	-			
	28 EM	-	14.78			
	1 EM	-	-			
	14-76 GM	4.56	106.8			
Muro Trombe superior	19-18 GM	15.79	67.19	-34.27 (7.95)	+86.72 (15.83)	+52.45
	79-71 GM	18.48	1.21			
	79 EM	-	3.58			
	94 EM	-	14.74			
	39 EM	-	-			
	6 EM	-	-			
	7 EM	-	-			
Pared norte	92-97 GM	2.27	0.17	-69.73 (16.18)	+5.5 (1)	-64.23
	93-68 GM	3.99	0.27			
	91-89 GM	21.68	4.68			
	60-61 GM	6.63	0.26			
	62-63 GM	10.29	0.06			
	64-65 GM	24.87	0.06			
Suelo	28-99 GM	18.89	3.14	-111.19 (25.80)	+39.28 (7.17)	-71.91
	31-99 GM	47.06	14.81			
	32-99 GM	45.24	21.33			
Techo	20-43 GM	40.35	74.47	-76.73 (17.80)	+151.48 (27.66)	+74.75
	21-41 GM	36.38	77.01			
Infiltraciones	1-11 GM	6.42	4.36	-52.78 (12.24)	+17.15 (3.13)	-35.63
	2-99 GM	2.19	0.83			
	3-99 GM	2.14	0.20			
	5-99 GM	3.54	1.14			
	6-16 GM	1.67	0.61			
	7-16 GM	1.27	0.49			
	22-16 GM	11.14	3.65			
	23-99 GM	24.41	5.87			
Puente térmico	20-99 GM	40.43	8.25	-40.43 (9.38)	+8.25 (1.5)	-32.18
Ganancias internas	3 EM	-	86.4	-	+86.4 (15.77)	+86.4
Total				-431.06	+547.66	+116.6

Los flujos caloríficos vienen expresados en MJ, con GM indican intercambios conductivos y con EM representan radiación solar incidente, mientras que los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

**Tabla 4.23 :** Balance térmico global de la casa nº 15 en el periodo comprendido entre los días 190 y 200.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-85.59 (19.85)	+200.1 (36.53)	+114.51
Ventanas	-64.34 (14.93)	+45 (8.22)	-19.34
Suelo	-111.19 (25.8)	+39.28 (7.17)	-71.91
Techo	-76.73 (17.8)	+151.48 (27.66)	+74.75
Infiltraciones	-52.78 (12.24)	+17.15 (3.13)	-35.63
Puente térmico	-40.43 (9.38)	+8.25 (1.5)	-32.18
Ganancias internas	-	+86.4 (15.77)	+86.4
Total	-431.06	+547.66	+116.6

Los flujos vienen expresados en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.



**Fig.4.17:** Representación de los resultados del balance térmico global de la casa nº 15, en el periodo comprendido entre los días 190 y 200.

En la Tabla 4.23 aparecen, también, los mismos resultados resumidos y agrupados por cerramientos, y en la Fig.4.17 en forma de diagrama de barras. De su análisis se desprende, al igual que pasaba en el periodo invernal comentado anteriormente, el poco peso específico que tienen en las ganancias las ventanas y las infiltraciones, contrariamente a la de las existentes a través del techo. Ello confirma la validez, también para este periodo, de las conclusiones apuntadas anteriormente para el periodo invernal y que podrían servirnos de pauta para una posible mejora del comportamiento energético de nuestro edificio, que trataremos en el próximo Capítulo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **ASHRAE.** "Fundamentals", ASHRAE Handbook. Atlanta. 1993.
2. **Goulding, J.R., Lewis, J.O. y Steemers, T.C.,** (Eds.). "Energy in Architecture. The European Passive Solar Handbook". Batsford for the Commission of the European Communities, N° EUR. 13446, Batsford Limited, Londres, Gran Bretaña, 1993.
3. **Walker, J.H. y Littler, J.G.F.** "Measurement of Long Term Interzone Airflows". CEC Final Report for DGXII, Contract N° EN3S.0037.UK (H).
4. **Duffie, J.A. y Beckman, W.A.** "Solar Engineering of Thermal Processes". Wiley-Interscience, New York, 1980.

**CAPÍTULO 5**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO  
DEL CONJUNTO BIOCLIMÁTICO DE BEGUES**

## **CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL CONJUNTO BIOCLIMÁTICO DE BEGUES.**

---

Después de la validación experimental del modelo de la casa nº 15 elaborado mediante el código PASSIM, usaremos ese modelo para intentar responder a múltiples cuestiones que pueden plantearse con relación al comportamiento térmico de ese edificio y otros de los del campo bioclimático de Begues que se pueden aparejar a él. Finalmente, contrastaremos esos resultados con los obtenidos en el seguimiento realizado.

En la mayoría de los casos, el estudio se ha realizado tanto para condiciones de invierno como de verano, ya que creemos que es, necesariamnete, desde la perspectiva del confort térmico durante esas dos estaciones que hay que analizar un edificio ubicado en la climatología mediterránea.

### **5.1 Simulación de la casa nº 15 (muro Trombe).**

Múltiples son las cuestiones que pueden plantearse sobre el comportamiento térmico de un edificio, es por ello que nuestro análisis será necesariamente limitado, las que aquí han sido consideradas han sido reunidas bajo dos grupos distintos: 1) estrategias de utilización del edificio y 2) parámetros de diseño del edificio.

Así como en el Capítulo anterior, por necesidades de la contrastación experimental, los resultados se han presentado en régimen de temperatura fluctuante sin empleo de energía auxiliar, en este Capítulo analizaremos, también, dado su interés, el comportamiento térmico del edificio en condiciones de régimen termostático, utilizando para ello una fuente de energía auxiliar. Es por eso, que en los resultados expuestos a continuación se han considerado indistintamente las dos posibilidades anteriores.

#### **5.1.1 Influencia de distintas estrategias de utilización.**

En el campo de la arquitectura bioclimática es sabido [1-3] que uno de los parámetros que más influyen en el comportamiento térmico de un edificio pasivo es la utilización que los usuarios hacen de los sistemas solares involucrados en él. Es por este motivo, que seguidamente analizaremos la influencia que distintas estrategias de utilización tienen sobre el rendimiento térmico de nuestra vivienda.

##### **5.1.1.1 Apertura de ventanas.**

Como ya comentamos en su momento, para la validación experimental realizada en el Capítulo anterior hemos utilizado los datos correspondientes a la casa nº 15, que, por ser el lugar desde donde se realizó el seguimiento, se encontró deshabitada y con los postigos y las persianas de las ventanas cerradas durante todo ese periodo de tiempo. Es por esta razón, que

la primera cuestión que nos planteamos en este apartado de simulación, fue estudiar la influencia que la apertura de esas protecciones tiene en el establecimiento de las condiciones térmicas de nuestro edificio. En el análisis estudiaremos particularmente el efecto de las ventanas orientadas al sur por su importante papel en las ganancias solares, abordando el estudio desde el punto de vista térmico, y obviando la interrelación existente con la iluminación. La apertura de ventanas se ha supuesto que se realiza entre las 7h y las 17h en el periodo invernal y entre las 6h y las 20h en el periodo estival.

En las Figs.5.1 y 5.2 se presentan para ambos periodos los perfiles de temperatura obtenidos para esta hipótesis. Comparando los resultados del periodo invernal de la Fig.5.1 con los correspondientes a la misma situación con las ventanas cerradas de la Fig.4.13, puede observarse como es, únicamente, en las habitaciones orientadas al sur donde puede percibirse un incremento notable de sus temperaturas (acompañado, al mismo tiempo, de la presencia de unas puntas de temperatura debidas, evidentemente, a las ganancias directas a través de las ventanas), siendo, en cambio, mucho menor ese incremento para las habitaciones orientadas al norte. Para el muro Trombe los incrementos en las temperaturas son casi imperceptibles, por lo que no se han presentado aquí. La Tabla 5.1, en donde figuran los resultados de las temperaturas medias, y máximas y mínimas absolutas, alcanzadas en ambos periodos, nos permite cuantificar mejor esos incrementos. Efectivamente, al compararlos con los de la Tabla 2.3, correspondientes a la misma situación con las ventanas cerradas, puede apreciarse como para el periodo invernal se producen incrementos de 2.5°C a 5°C en las temperaturas medias de las habitaciones de la cara sur y de 1.5°C a 2° C en las de las habitaciones de la cara norte. Siendo mucho mayores los incrementos para las máximas absolutas: de 4°C a 10°C para las habitaciones sur y de 2°C para las habitaciones norte, y algo menores para las mínimas: de entre 1.5°C a 2.5°C y de 1.5°C, respectivamente.

**Tabla 5.1:** Temperaturas simuladas (en °C) de la casa nº 15 cuando se considera la hipótesis de apertura de ventanas.

Hab. nº	Situación	Días 340-350			Días 190-200		
		Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.
1	Sur inf.	14.8	19.1	26.6	26.2	28.6	32.5
2	Norte inf.	10.4	11.8	12.5	24.0	25.3	27.2
5	Norte sup.	10.7	11.5	12.2	24.7	25.6	27.4
6	Sur sup.	13.5	17.9	23.3	25.2	27.1	29.8
11	Trombe inf.	5.34	13.3	31.4	16.6	26.0	37.4
16	Trombe sup.	7.33	15.3	34.8	18.0	25.0	33.3

Algo parecido, aunque con incrementos menores, puede observarse para el periodo estival, al compararse las Fig.5.2 y Fig.4.11, correspondientes a la misma situación con ventanas abiertas y cerradas, respectivamente. En este caso, sin embargo, las puntas de temperaturas debidas a las ganancias a través de las ventanas, quedan restringidas, únicamente, a la habitación sur inferior, ya que las ventanas superiores quedan sombreadas por el voladizo de esa fachada. No obstante, en este caso, esas puntas alcanzan aquí valores superiores a los 30 °C creando una situación de disconfort térmico que habrá que evitar. Al igual que antes la Tabla 5.1 nos permite cuantificar estos incrementos, que son para las temperaturas medias de 1°C a 2°C para las habitaciones de la cara sur y de 1°C para las de la cara norte. Mientras que para las extremas superiores, los incrementos van de algunas décimas a 2°C para las habitaciones sur, y para las extremas inferiores son inferiores a 1°C, en todos los casos.

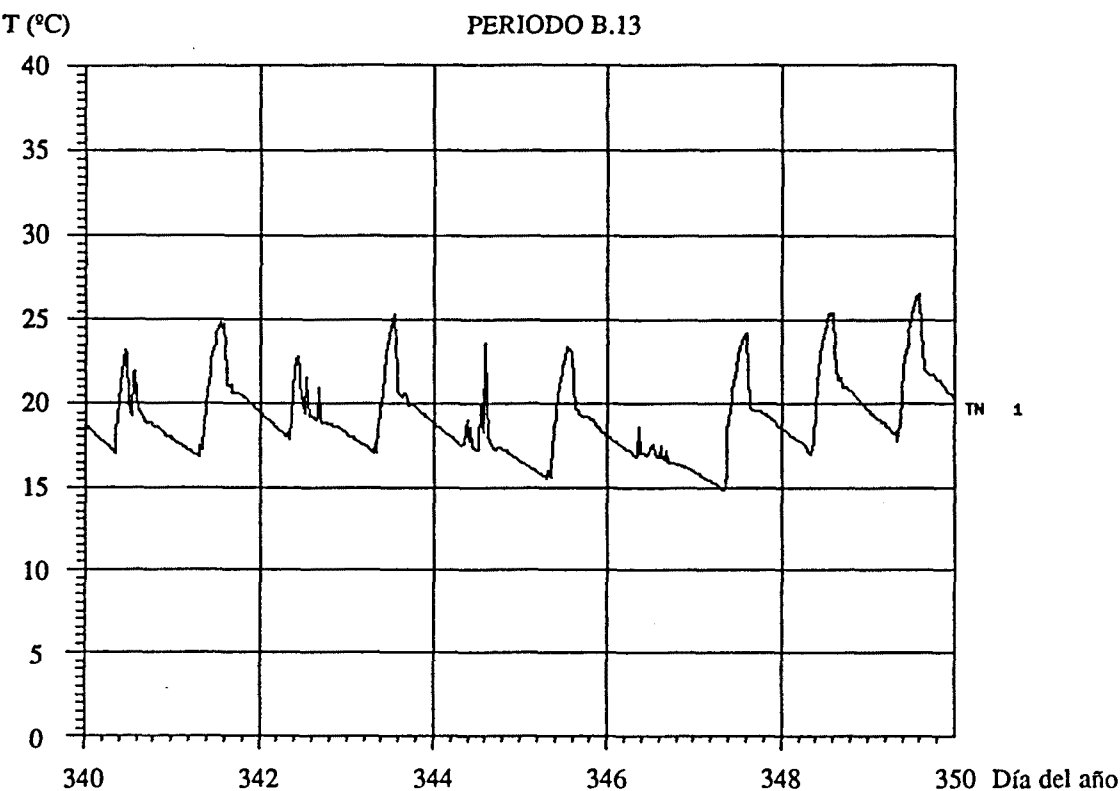


Fig.5.1a: Temperaturas simuladas en el comedor para la hipótesis de apertura de ventanas.

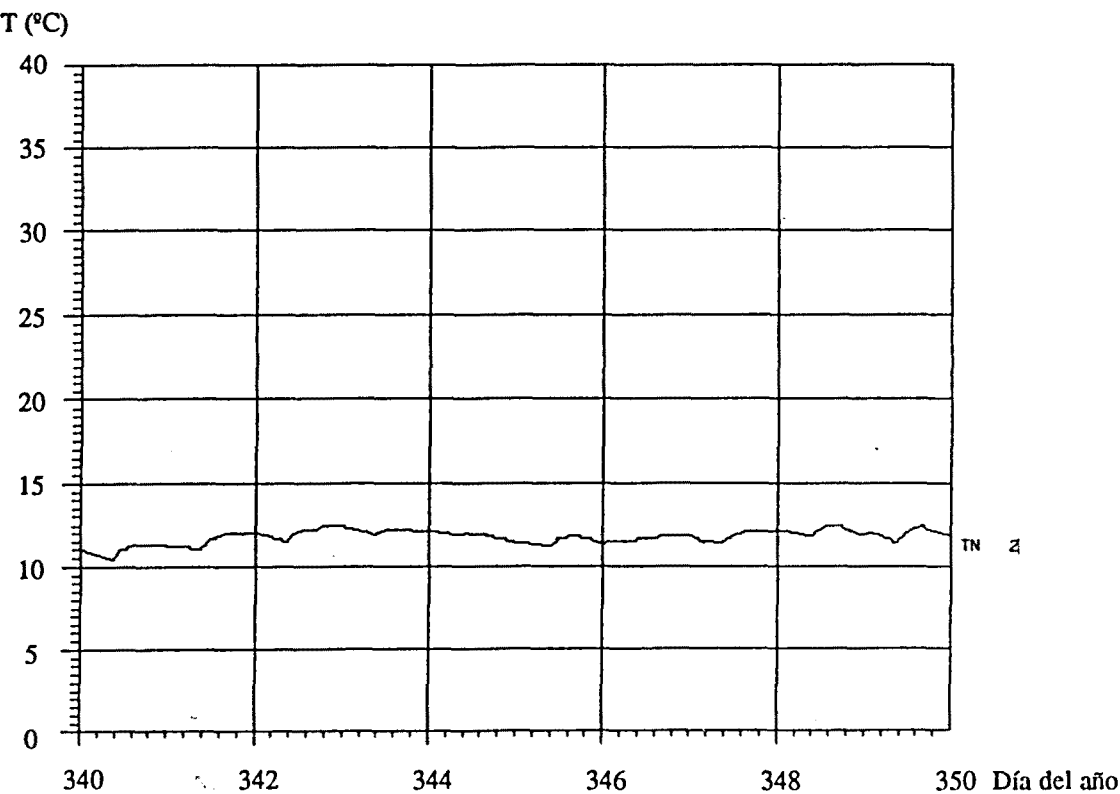


Fig.5.1b: Temperaturas simuladas en la cocina para la hipótesis de apertura de ventanas.



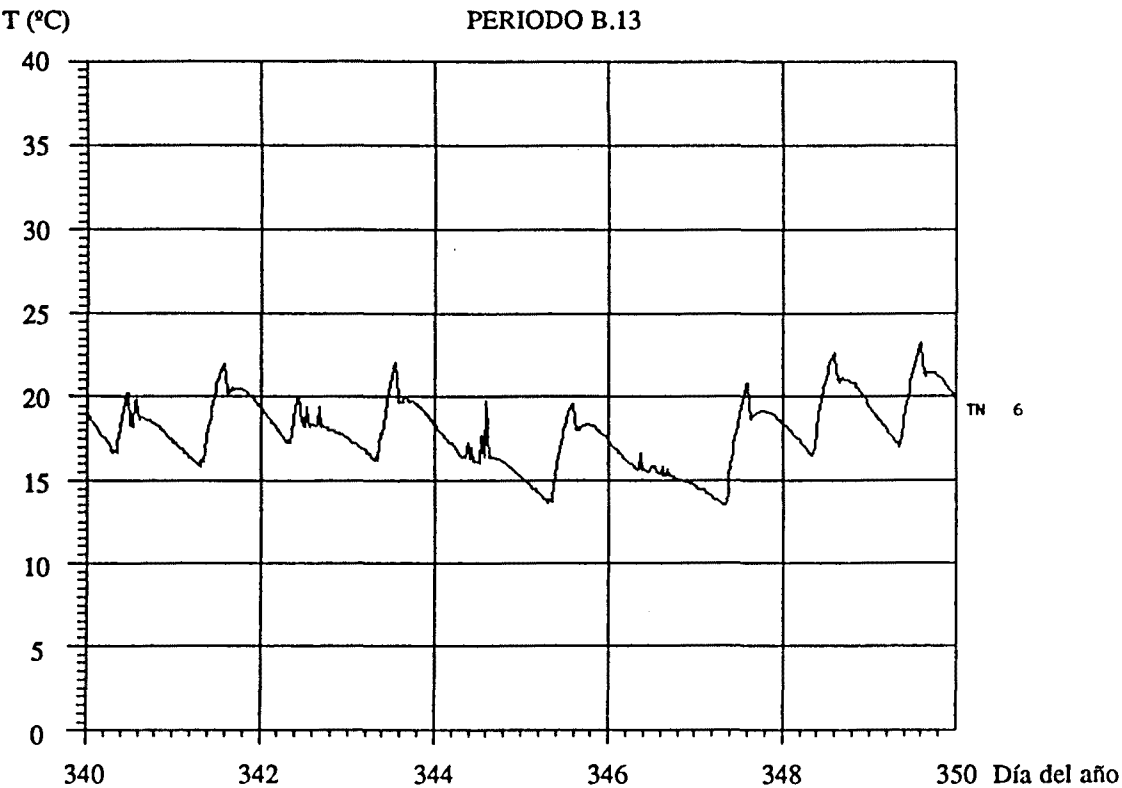


Fig.5.1c: Temperaturas simuladas en la habitación 6 para la hipótesis de apertura de ventanas.

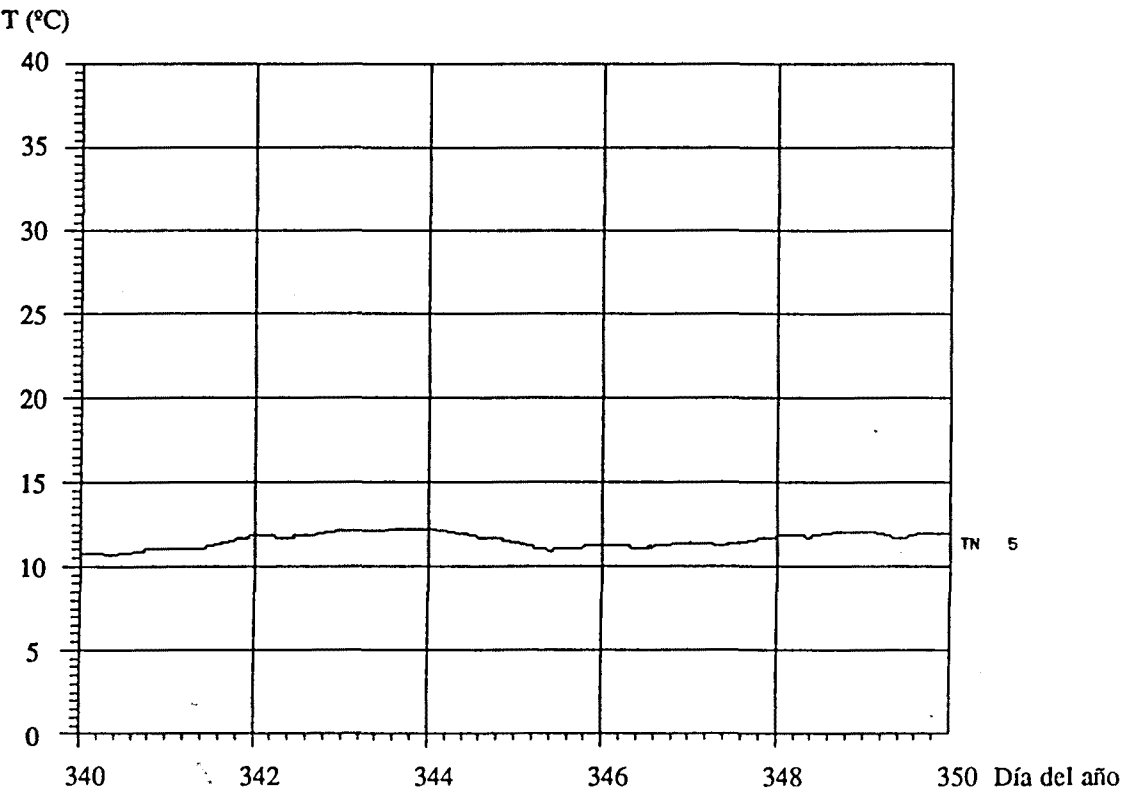


Fig.5.1d: Temperaturas simuladas en la habitación 5 para la hipótesis de apertura de ventanas.

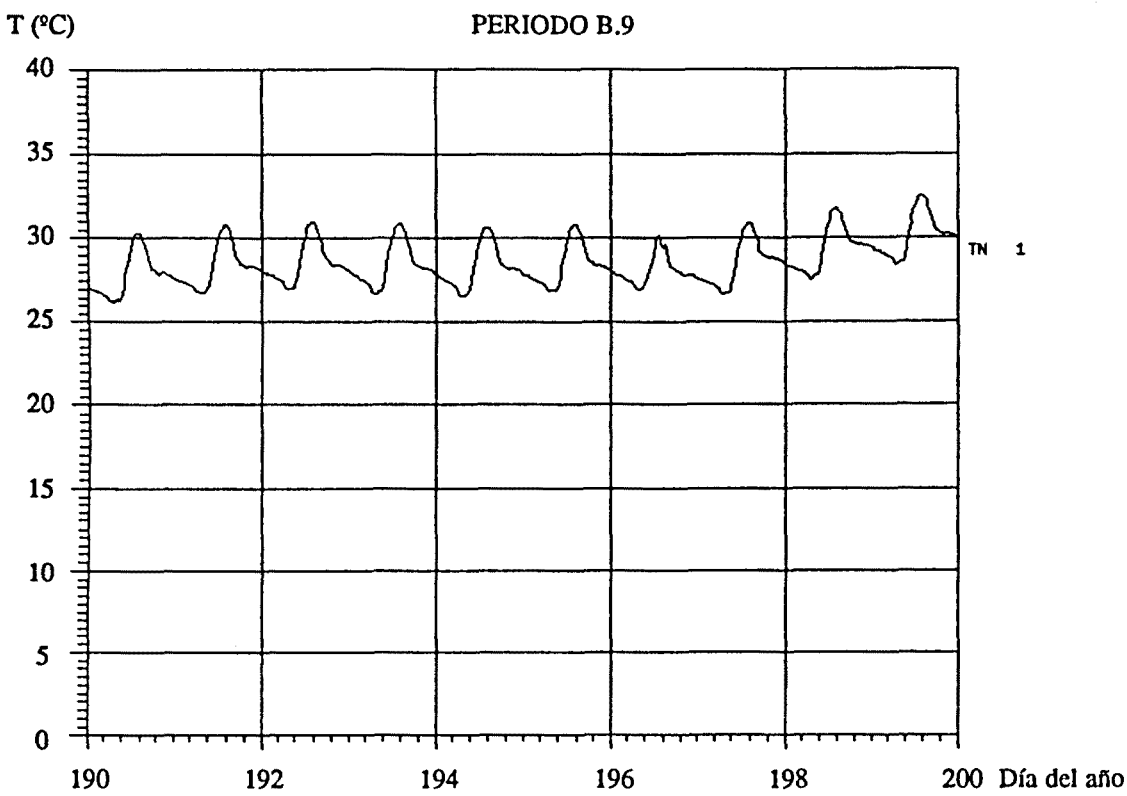


Fig.5.2a: Temperaturas simuladas en el comedor para la hipótesis de apertura de ventanas.

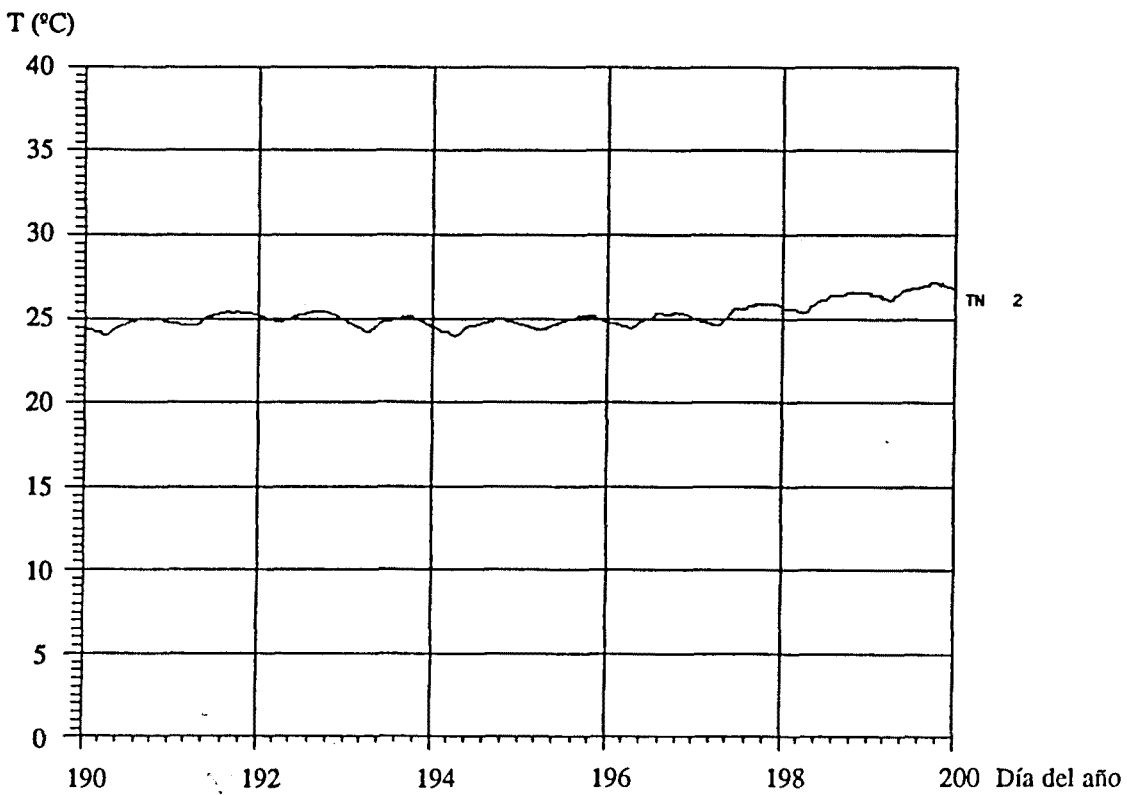


Fig.5.2b: Temperaturas simuladas en la cocina para la hipótesis de apertura de ventanas.

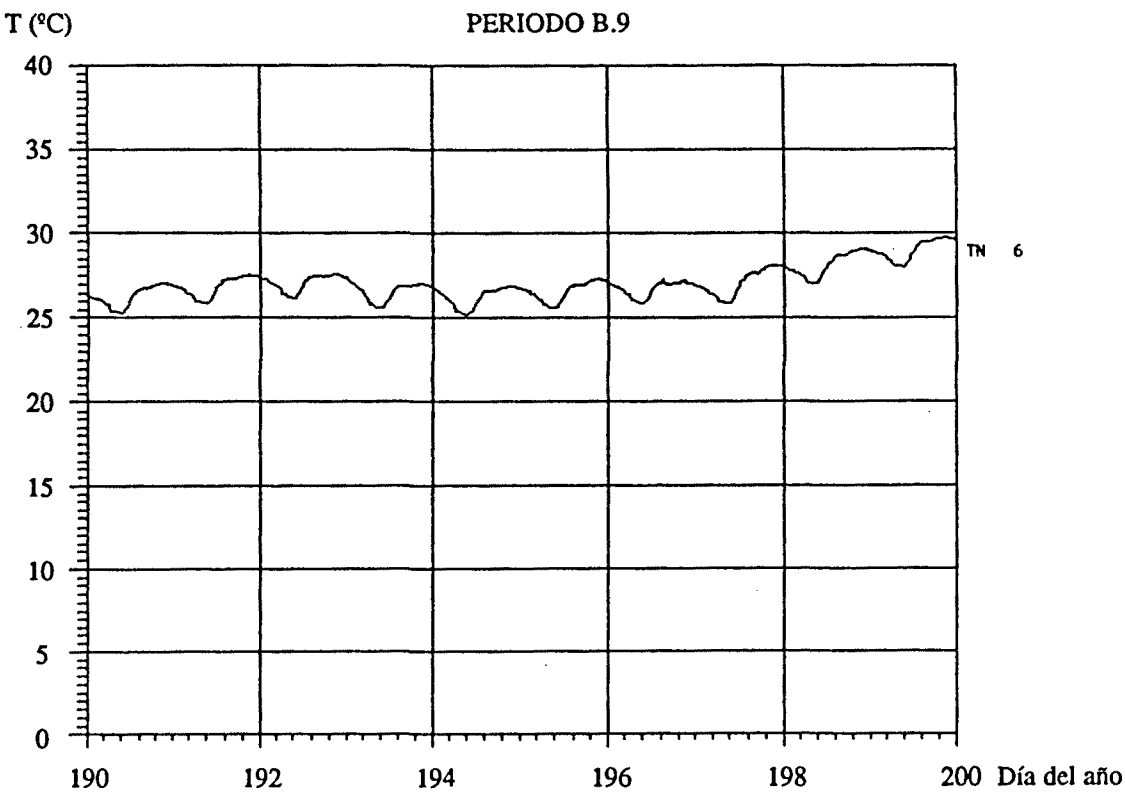


Fig.5.2c: Temperaturas simuladas en la habitación 6 para la hipótesis de apertura de ventanas.

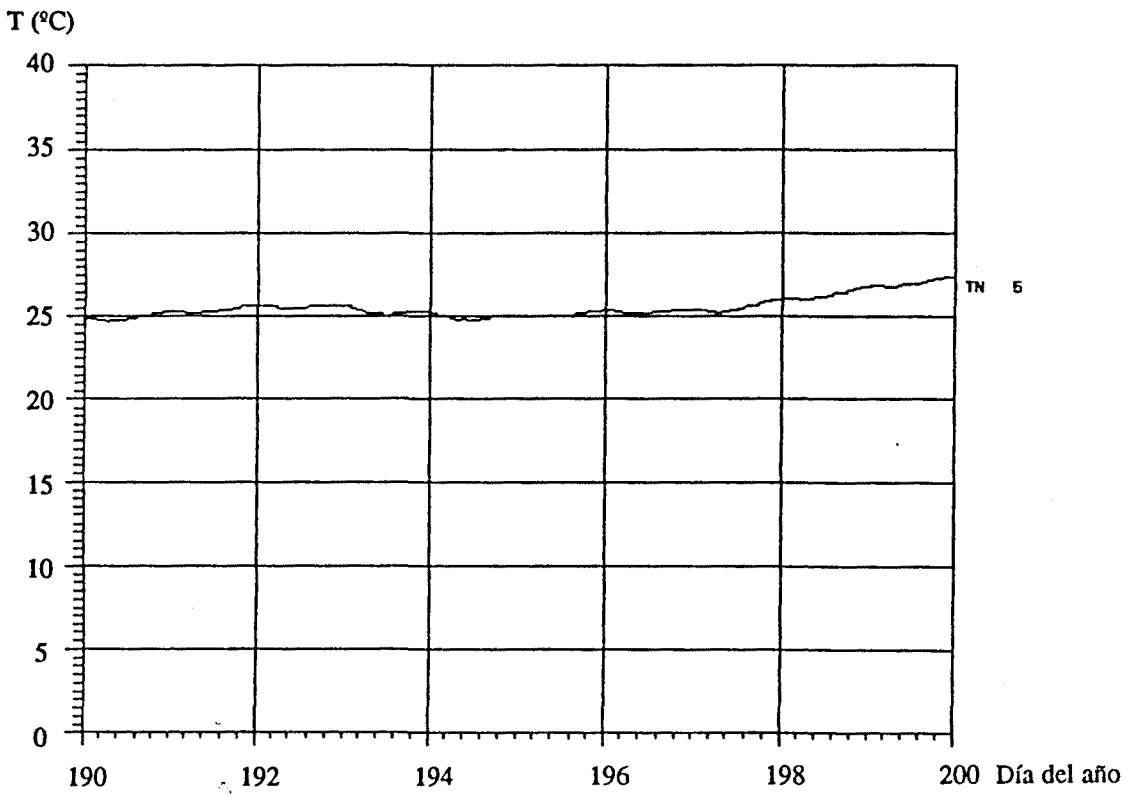


Fig.5.2d: Temperaturas simuladas en la habitación 5 para la hipótesis de apertura de ventanas.

**Tabla 5.2:** Intercambios caloríficos entre la casa nº 15 y el exterior, para la hipótesis de apertura de ventanas en el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

Elemento	Intercambio	Q saliente	Q entrante	Q sal. total	Q ent. total	Q total
Muro Trombe inferior	85-77 GM	14.66	23			
	82-53 GM	36.49	3.06			
	90-30 GM	134	-	-195.71	+662.38	+466.67
	90 EM	-	37.82	(16.73)	(52.90)	
	28 EM	-	248.1			
	1 EM	-	208.8			
	14-76 GM	10.56	141.6			
Muro Trombe superior	19-18 GM	2.39	265.9			
	79-71 GM	31.29	10.71			
	79 EM	-	16.66	-33.68	+476.75	+443.07
	94 EM	-	0.48	(2.88)	(38.08)	
	39 EM	-	91.50			
	6 EM	-	45.75			
	7 EM	-	45.75			
Pared norte	92-97 GM	4.51	-			
	93-68 GM	7.25	-			
	91-89 GM	39.69	-	-131.02	-	-131.02
	60-61 GM	14.91	-	(11.20)	-	
	62-63 GM	21.66	-			
	64-65 GM	43	-			
Suelo	28-99 GM	60.66	-	-225.13	+3.11	-222.02
	31-99 GM	87.82	0.57	(19.24)	(0.25)	
	32-99 GM	76.65	2.54			
Techo	20-43 GM	276.8	-	-439.8	-	-439.8
	21-41 GM	163	-	(37.6)	-	
Infiltraciones	1-11 GM	15.84	1.15			
	2-99 GM	4.36	0.02			
	3-99 GM	3.97	-			
	5-99 GM	6.12	0.06	-81.55	+22.94	-58.61
	6-16 GM	2.74	0.92	(6.97)	(1.83)	
	7-16 GM	2.11	0.63			
	22-16 GM	9.80	19.59			
	23-99 GM	36.61	0.57			
Puente térmico	20-99 GM	62.92	0.33	-62.92	+0.33	-62.59
Ganancias internas	3 EM	-	86.4	-	+86.4	+86.4
Total				-1169.81	+1251.91	+82.1

Los flujos caloríficos vienen expresados en MJ, con GM indican intercambios conductivos y con EM representan radiación solar incidente, mientras que los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna. Se ha considerado que la apertura de las ventanas se realiza entre las 7h y las 17h.

En las Tablas 5.2 y 5.3 se detallan bajo esta hipótesis y para ambos periodos considerados, los intercambios caloríficos de la casa nº 15 con el exterior. De su análisis se puede constatar, otra vez, la gran importancia de las ganancias directas a través de la ventana del comedor, cuando ésta se encuentra abierta. Efectivamente, para el periodo invernal, puede verse como de 218 MJ ganados en todo el muro inferior cuando la ventana está cerrada, pasamos a 467 MJ al abrirla, de los cuales 361 MJ lo son a través de ella, lo cual representa casi el 40% de las ganancias solares del edificio. Mientras que para el periodo estival, de 107

MJ ganados con la ventana cerrada, pasamos a 244 MJ al abrirla, 183 MJ de los cuales lo son a través de esa ventana, que significan en este caso el 55% del aporte solar. Una importancia mucho menor supone, en cambio, la apertura de las ventanas del piso superior. En términos totales, la apertura de todas las ventanas representa un incremento de la energía almacenada en el edificio de 60 MJ en el periodo invernal y de 41 MJ en el estival.

**Tabla 5.3:** Intercambios caloríficos entre la casa nº 15 y el exterior, para la hipótesis de apertura de ventanas en el periodo comprendido entre los días 190 y 200.

Elemento	Intercambio	Q saliente	Q entrante	Q sal. total	Q ent. total	Q total
Muro Trombe inferior	85-77 GM	10.3	15.33			
	82-53 GM	20.65	4.92			
	90-30 GM	77.65	0.07			
	90 EM	-	23.98	-118.53	+362.17	+243.64
	28 EM	-	125.6	(20.69)	(49.57)	
	1 EM	-	110.8			
	14-76 GM	9.93	81.47			
Muro Trombe superior	19-18 GM	21.72	56.23			
	79-71 GM	25.01	3.18			
	79 EM	-	3.59			
	94 EM	-	-	-46.73	+96.18	+49.45
	39 EM	-	16.59	(8.16)	(13.16)	
	6 EM	-	8.29			
	7 EM	-	8.29			
Pared norte	92-97 GM	2.64	0.10			
	93-68 GM	4.50	0.17			
	91-89 GM	25.08	3.31			
	60-61 GM	8.03	0.11	-80.62	+3.69	-76.93
	62-63 GM	12.34	-	(14.07)	(0.5)	
	64-65 GM	28.03	-			
Suelo	28-99 GM	27.02	1.07			
	31-99 GM	53.69	11.29	-131.39	+30.19	-101.2
	32-99 GM	50.68	17.83	(22.94)	(4.13)	
Techo	20-43 GM	48.72	65.05	-92.63	132.31	+39.68
	21-41 GM	43.91	67.26	(16.17)	(18.11)	
Infiltraciones	1-11 GM	8.51	1.86			
	2-99 GM	2.52	0.65			
	3-99 GM	2.44	0.13			
	5-99 GM	3.93	0.91			
	6-16 GM	1.89	0.42	-60.21	+12.28	-47.93
	7-16 GM	1.43	0.30	(10.51)	(1.68)	
	22-16 GM	12.26	3.18			
	23-99 GM	27.23	4.83			
Puente térmico	20-99 GM	42.73	7.34	-42.73	+7.34	-35.39
		(7.46)	(1)			
Ganancias internas	3 EM	-	86.4	-	+86.4	+86.4
				(11.83)		
Total				-572.84	+730.56	+157.72

Los flujos caloríficos vienen expresados en MJ, con GM indican intercambios conductivos y con EM representan radiación solar incidente, mientras que los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna. Se ha considerado que la apertura de las ventanas se realiza entre las 6h y las 20h.

**Tabla 5.4:** Balance térmico global de la casa nº 15 bajo la hipótesis de apertura de ventanas para el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-143.67 (12.28)	+433.56 (34.63)	+289.89
Ventanas	-216.74 (18.52)	+705.57 (56.36)	+488.83
Suelo	-225.13 (19.24)	3.11 (0.25)	-222.02
Techo	-439.8 (37.6)	- -	-439.80
Infiltraciones	-81.55 (6.97)	+22.94 (1.83)	-58.61
Puente térmico	-62.92 (5.38)	+0.33 (0.02)	-62.59
Ganancias internas	- -	+86.4 (6.90)	+86.4
Energía auxiliar	- -	- -	-
Total	-1169.81	+1251.91	+82.10

Los flujos vienen expresados en MJ y los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

**Tabla 5.5:** Balance térmico global de la casa nº 15 bajo la hipótesis de apertura de ventanas para el periodo comprendido entre los días 190 y 200.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-111.0 (19.38)	+158.06 (21.63)	+47.06
Ventanas	-134.88 (23.55)	+303.98 (41.61)	+169.1
Suelo	-131.39 (22.94)	-30.19 (4.13)	-101.2
Techo	-92.63 (16.17)	132.31 (18.11)	+39.68
Infiltraciones	-60.21 (10.51)	+12.28 (1.68)	-47.93
Puente térmico	-42.73 (7.46)	+7.34 (1)	-35.39
Ganancias internas	- -	+86.4 (11.83)	+86.4
Energía auxiliar	- -	- -	-
Total	-572.84	+730.56	+157.72

Los flujos vienen expresados en MJ y los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

En resumen, observamos, como la apertura de las ventanas nos permite, para la situación de invierno y, al menos, para las habitaciones de la cara sur, alcanzar una situación de confort térmico durante una gran parte de las horas del día; mientras que para la situación de verano, la apertura de las ventanas nos aleja considerablemente de esta situación de confort, a causa de la aparición de sobrecalentamiento. Este resultado apunta hacia una estrategia de utilización, que más tarde volveremos a considerar.

En las Tablas 5.4 y 5.5 y en la Fig.5.3 se presentan los resultados del balance correspondiente a esta situación de apertura de ventanas, para los dos periodos considerados. En ellas, puede apreciarse el importante papel que ahora están desempeñando las ventanas. Concretamente, comparando estos resultados con los obtenidos para la situación de ventanas cerradas de la Tablas 4.15 y 4.17, puede verse, para el periodo de invierno, como las ganancias a través de las ventanas han pasado de representar el 17.4% del total, al 56.4%, mientras que las ganancias a través de las paredes han descendido del 67.3% al 34.6%. De igual forma puede verse como, para el periodo de verano, el peso relativo de las ventanas en las ganancias ha pasado del 8.2% al 41.6%, y el de las paredes del 36.5% al 21.6%.

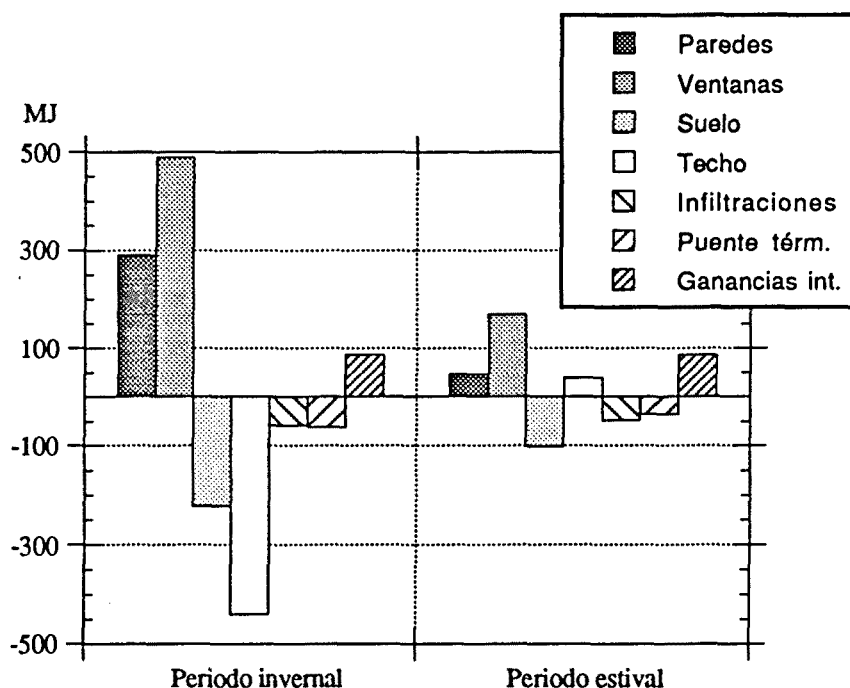


Fig.5.3: Representación de los resultados del balance térmico global de la casa nº 15 cuando se considera la apertura de ventanas.

#### 5.1.1.2 Empleo de energía auxiliar.

La segunda de las cuestiones abordadas, con relación a las estrategias de utilización, es la del empleo de una fuente de energía auxiliar que nos permita mantener en nuestro edificio el nivel de confort térmico de forma permanente. Esta situación, habitual en el uso de una vivienda, nos permitirá, además, poder comparar fácilmente el comportamiento térmico global del edificio en términos de su consumo energético, en función de distintas estrategias de utilización o con relación a otros edificios. Sin embargo, no entraremos aquí a analizar el tipo concreto de energía auxiliar empleada, sino simplemente nos fijaremos como objetivo la determinación de la potencia calorífica necesaria para el mantenimiento de esas condiciones.

Para poder ver la influencia que el régimen termostático elegido tiene sobre el consumo de energía auxiliar, nos plantearemos diferentes hipótesis de utilización, tanto para el periodo de invierno como para el de verano. En todos los casos consideraremos la hipótesis de apertura de ventanas, supuesta en el apartado anterior, ya que es la situación más habitual en una vivienda. Los casos estudiados son los siguientes:

Periodo de invierno, días 340-350:

- I.a) Mantenimiento de una temperatura mínima de 19°C en todas las dependencias de la casa.
- I.b) Mantenimiento de una temperatura mínima de 20°C en todas las dependencias de la casa.
- I.c) Mantenimiento de una temperatura mínima de 21°C en todas las dependencias de la casa.
- I.d) Mantenimiento de una temperatura mínima de 20 °C en el comedor-sala de estar y de 18°C en las restantes dependencias de la casa.

Periodo de verano, días 190-200:

- V.a) Mantenimiento de una temperatura máxima de 24°C en todas las dependencias de la casa.
- V.b) Mantenimiento de una temperatura máxima de 25°C en todas las dependencias de la casa.
- V.c) Mantenimiento de una temperatura máxima de 26°C en todas las dependencias de la casa.
- V.d) Mantenimiento de una temperatura máxima de 25°C en el comedor-sala de estar y de 27°C en las restantes dependencias de la casa.

#### Periodo de invierno.

Caso I.a):

En la Figs.5.4 se muestran los perfiles de consumo energético y temperaturas obtenidas en el caso I.a) para la habitación 5 (situación norte-superior) y la habitación 1 (situación sur-inferior), que son, tal como puede verse en la Tabla 5.6, las que presentan mayor y menor demanda de energía auxiliar, respectivamente. En ésta, además del consumo energético en cada una de las dependencias de la casa, se muestran, también, las temperaturas medias, y máximas y mínimas absolutas, obtenidas para esta situación. Puede verse como en las habitaciones orientadas al sur se producen máximas puntuales de discomfort térmico, las cuales podrían evitarse p.e. cerrando las persianas en esos momentos de máxima insolación. Puede verse también, como, a causa de las ganancias solares, las necesidades de energía auxiliar para esas habitaciones son mínimas; mientras que para las habitaciones orientadas al norte ocurre todo lo contrario, donde la demanda energética es prácticamente constante a lo largo del tiempo.

En la Tabla 5.7 se presentan los resultados correspondientes al balance energético global realizado para este caso, en ella puede verse como la energía auxiliar consumida es de 627 MJ, que suponen casi un 35% del total del calor ganado. Para mayor claridad, podemos expresar este dato en términos de ahorro energético obtenido gracias al aprovechamiento de la energía solar. Para ello recurriremos al concepto de fracción de ahorro solar (FAS), que el Grupo de Trabajo de Energía Solar Pasiva de la Comunidad Europea define [4] como la relación del aporte solar con la energía total perdida por el edificio (que coincide con la ganada cuando despreciamos la energía almacenada en la estructura del edificio). De acuerdo a esto, podemos escribir las siguientes igualdades:



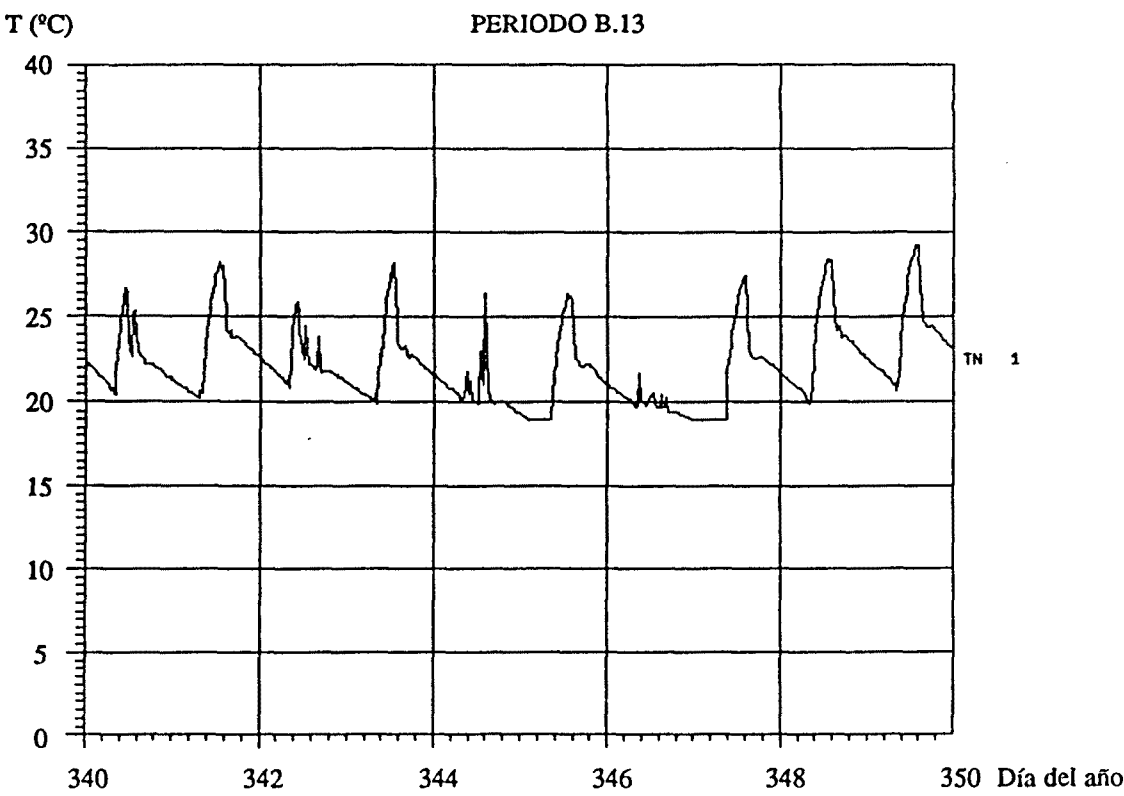


Fig.5.4a: Temperaturas simuladas en la habitación 1 para la hipótesis del caso I.a.

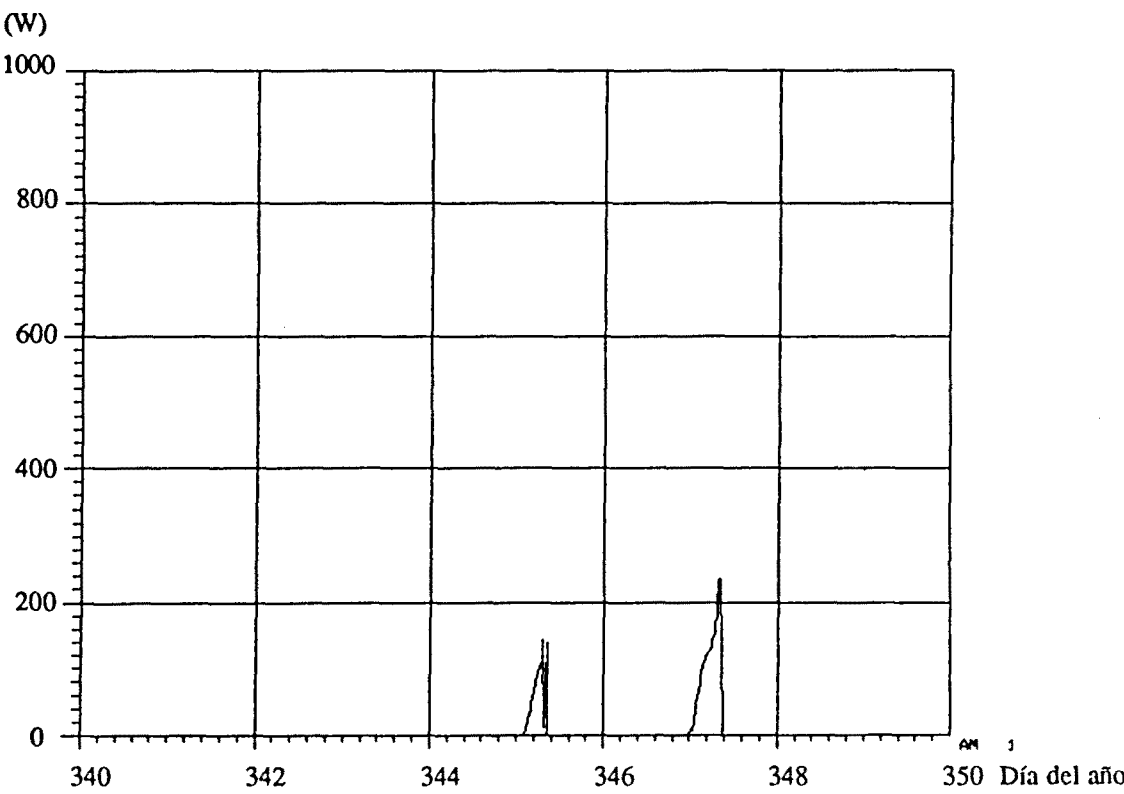


Fig.5.4b: Consumo energético en la habitación 1 para la hipótesis del caso I.a.

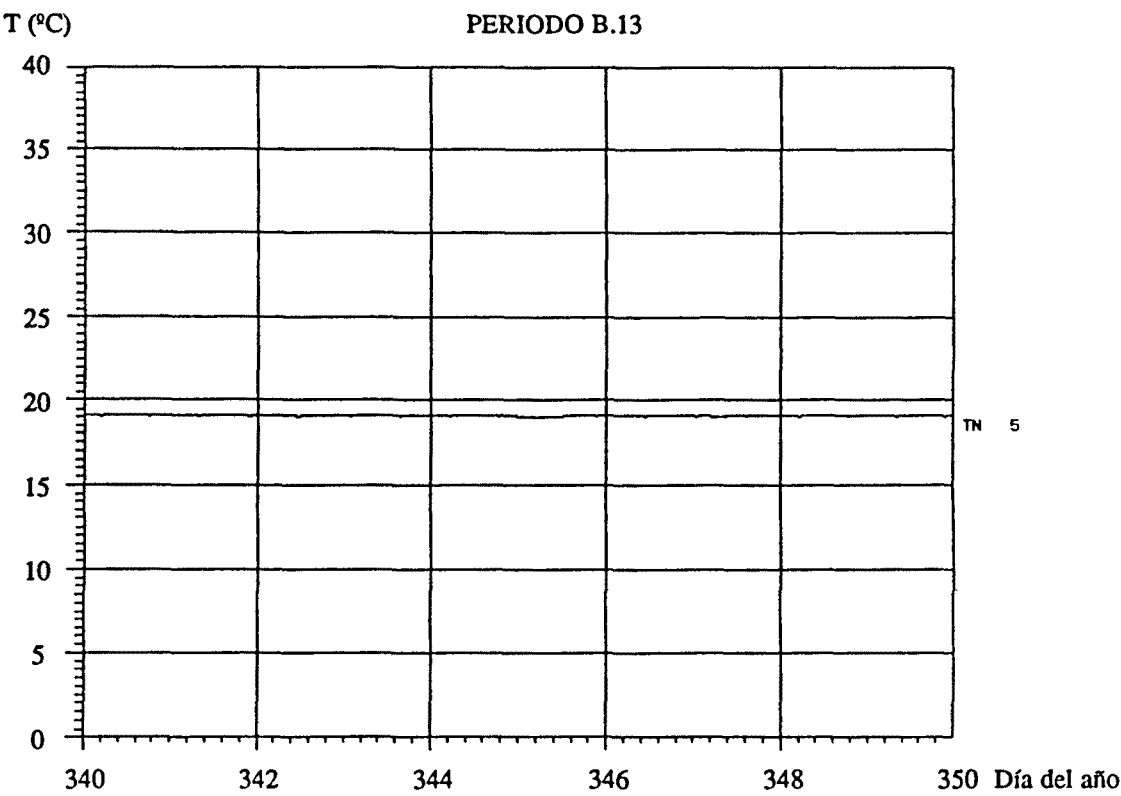


Fig.5.4c: Temperaturas simuladas en la habitación 5 para la hipótesis del caso I.a.

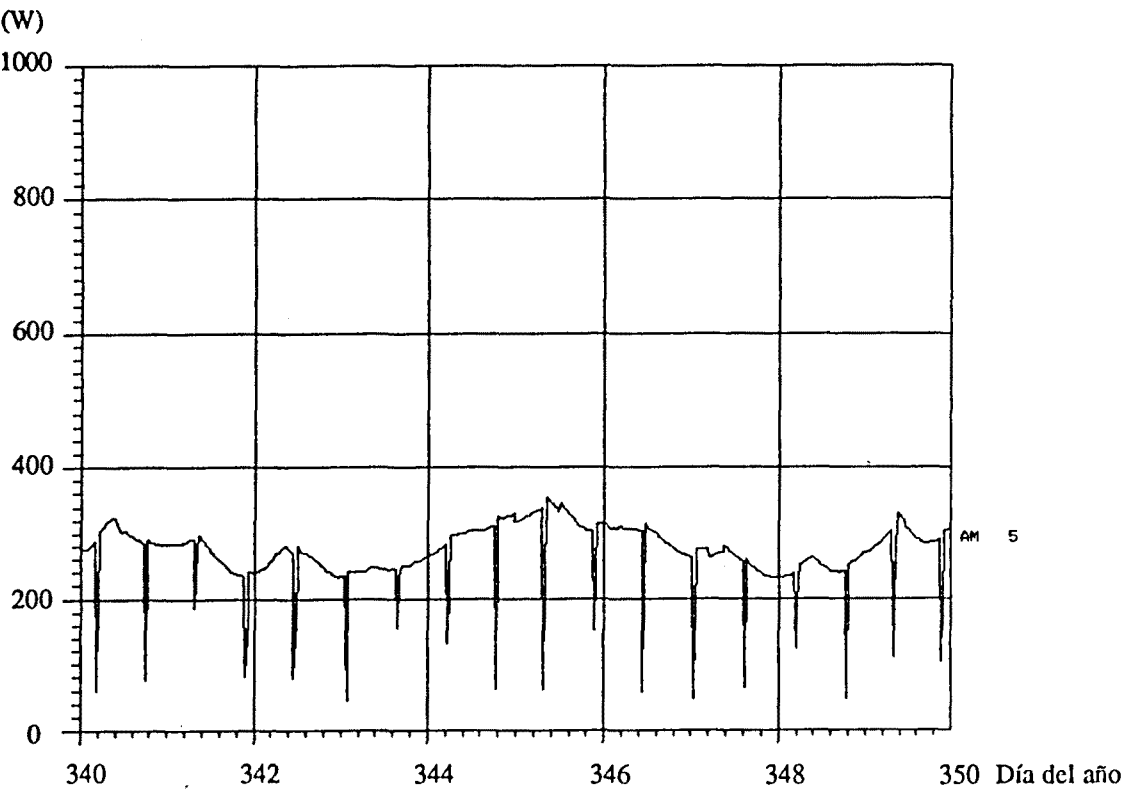


Fig.5.4d: Consumo energético en la habitación 5 para la hipótesis del caso I.a.

$$Q_{\text{perd}} \equiv Q_{\text{gan}} = Q_{\text{aux}} + Q_{\text{int}} + \text{C.S.}$$

$$\text{F.A.S.} = \frac{\text{C.S.}}{Q_{\text{perd}}} = 1 - \frac{Q_{\text{aux}} + Q_{\text{int}}}{Q_{\text{perd}}}$$

Sin embargo, el hecho de definir la FAS con relación a la energía perdida, no responde a otra razón que la de poder determinar la contribución solar por el método sustractivo, basado en esa energía perdida, y que normalmente es más fácil de determinar que la ganada (véase p.e. el método de los grados-día). No obstante, ya que en nuestro caso, podemos, a partir de los datos de la simulación, calcular con la misma facilidad la energía perdida que la ganada, definiremos la fracción de ahorro solar como la relación entre el aporte solar y la energía total ganada, puesto que nos parece más lógico. Además, esta modificación supone diferencias mínimas de cara al resultado final.

**Tabla 5.6:** Consumos energéticos totales y temperaturas obtenidas para el caso I.a.

Habitación	Situación	Energía auxiliar (MJ)	Ganancias internas (MJ)	T mínima	T media	T máxima
1	sur-inf.	+4.97	-	19	22.2	29.3
2	norte-inf.	+175.3	-	19	19.1	19.1
3	norte-inf.	+6.5	+86.4	19	19.1	19.4
4	central-inf.	+17.05	-	19	19	19.2
5	norte-sup.	+234.2	-	19	19.1	19.1
6	sur-sup.	+25.04	-	19	20.6	25.3
7	sur-sup.	+19.96	-	19	20.7	26
8	central-sup.	+73.54	-	19	19.1	19.1
9	central-sup.	+70.71	-	19	19.1	19.2

Aplicando la definición anterior a los resultados presentados en la Tabla 5.7, obtenemos que

$$\text{C.S.} = 1795.27 - 86.4 - 627.27 = 1081.6 \text{ MJ}$$

$$\text{F.A.S.} = 60.24\%$$

lo cual indica que el 60% de la energía ganada lo es por medios solares. Debemos de observar, que una parte de este valor es debido a las infiltraciones, que si bien no son directamente un aporte solar, sí que tienen su origen en él.

Casos I.b) e I.c):

Aparte del incremento experimentado por las temperaturas y el consumo de energía auxiliar, en estos casos y tal como puede verse a partir de las Tablas 5.8 y 5.9, pocas son las diferencias apreciadas con relación al caso anterior. De estos resultados podemos ver como la

energía auxiliar consumida es para cada uno de ellos de 748 MJ y 873 MJ (frente a los 627 MJ anteriores), lo cual representa un 39% y un 43% del total del calor aportado, que en términos de ahorro solar significa unas FAS del 56.14% y 52.36%, respectivamente. En la Fig.5.5 se han representado estos valores, cuyo ajuste polinómico se traduce en la siguiente ecuación

$$y = 2.2 x^2 + 35.2 x - 832$$

(5.1)

**Tabla 5.7:** Balance térmico global de la casa nº 15 en el régimen termostático del caso I.a.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-216.17 (12.24)	+360.28 (20.07)	+144.11
Ventanas	-302.70 (17.14)	+702.60 (39.14)	+399.90
Suelo	-346.91 (19.65)	- -	-346.91
Techo	-647.50 (36.67)	- -	-647.50
Infiltraciones	-151.28 (8.56)	+18.68 (1.04)	-132.60
Puente térmico	-74.36 (4.21)	+0.04 -	-74.32
Ganancias internas	- -	+86.4 (4.81)	+86.4
Energía auxiliar	-	627.27 (34.94)	627.27
Total	-1765.66	+1795.27	+29.61

Los flujos vienen expresados en MJ y los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

**Tabla 5.8:** Consumos energéticos totales y temperaturas obtenidas para el caso I.b.

Habitación	Situación	Energía auxiliar (MJ)	Ganancias internas (MJ)	T mínima	T media	T máxima
1	sur-inf.	+10.45	-	20	22.8	29.9
2	norte-inf.	+197.5	-	20	20.1	20.1
3	norte-inf.	+16.52	+86.4	20	20	20.1
4	central-inf.	+23.96	-	20	20	20
5	norte-sup.	+258.3	-	20	20	20.1
6	sur-sup.	+37.19	-	20	21.2	25.7
7	sur-sup.	+29.56	-	20	21.4	26.4
8	central-sup.	+85.01	-	20	20.1	20.1
9	central-sup.	+89.39	-	20	20.1	20.1

Tabla 5.9: Consumos energéticos totales y temperaturas obtenidas para el caso I.c.

Habitación	Situación	Energía auxiliar (MJ)	Ganancias internas (MJ)	T mínima	T media	T máxima
1	sur-inf.	+18.31	-	21	23.4	30.4
2	norte-inf.	+218.4	-	21	21.1	21.1
3	norte-inf.	+29.67	+86.4	21	21	21.1
4	central-inf.	+30.48	-	21	21	21.1
5	norte-sup.	+280.5	-	21	21.1	21.1
6	sur-sup.	+52.17	-	21	21.9	26.2
7	sur-sup.	+41.23	-	21	22	26.8
8	central-sup.	+95.61	-	21	21.1	21.1
9	central-sup.	+106.5	-	21	21.1	21.1

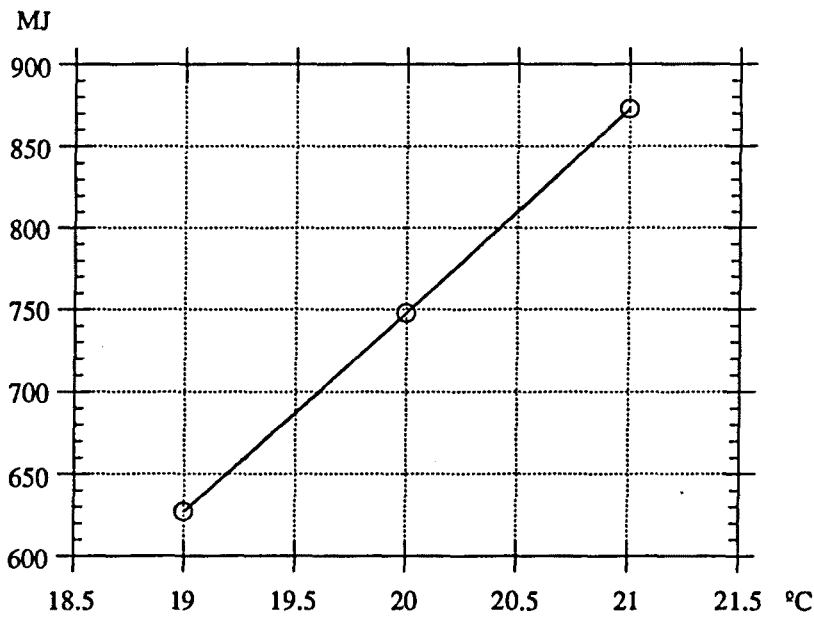


Fig.5.5: Consumo de energía auxiliar en función de la temperatura de confort interior.

Caso I.d):

En la Tabla 5.10 se presentan los resultados obtenidos para este caso. Puede verse como el consumo de energía auxiliar de 526 MJ, es sensiblemente inferior a los anteriores y sólo ligeramente superior al que se obtendría si toda la casa se mantuviera a 18°C, que según la Ec.5.1 sería de 514 MJ. La FAS en esta situación sube hasta el 64.07%.

Tabla 5.10: Consumos energéticos totales y temperaturas obtenidas para el caso I.d.

Habitación	Situación	Energía auxiliar (MJ)	Ganancias internas (MJ)	T mínima	T media	T máxima
1	sur-inf.	+30.96	-	20	22	29
2	norte-inf.	+148.1	-	18	18	18.1
3	norte-inf.	+0.7	+86.4	18	18.4	18.8
4	central-inf.	+7.61	-	18	18.1	18.6
5	norte-sup.	+206.1	-	18	18.1	18.1
6	sur-sup.	+14.39	-	18	20	25
7	sur-sup.	+11.43	-	18	20.2	25.7
8	central-sup.	+59.58	-	18	18	18.1
9	central-sup.	+46.93	-	18	18.1	18.6

Periodo estival.

Caso V.a:

Como era lógico esperar y contrariamente a lo sucedido para el periodo invernal las habitaciones sur son ahora, tal como puede verse en la Tabla 5.11, las que presentan una mayor demanda de energía auxiliar. En ella pueden verse también las temperaturas medias, y las máximas y mínimas absolutas alcanzadas en este periodo. En la Figs.5.6 se muestran, así mismo, los perfiles de consumo energético y temperaturas correspondientes a las habitaciones 1 y 5, que representan a los casos extremos en cuanto a consumo de energía auxiliar. Al igual que sucedía antes para las habitaciones sur, son ahora las habitaciones norte las que prácticamente no presentan demanda de energía auxiliar para poder alcanzar la temperatura de confort preestablecida.

En la Tabla 5.12 se presentan los resultados correspondientes al balance energético global realizado para este caso, puede verse como la energía auxiliar necesaria es de 606 MJ, lo cual supone un 63.5% del total de las pérdidas. Para poder expresar estos valores en términos de ahorro conseguido por medios naturales, definiremos una Fracción de Ahorro Estival (F.A.E.), similar a la definida anteriormente para el periodo invernal, como la relación de la energía pérdida por medios naturales y la total

$$F.A.E. = \frac{Q_{\text{perd.medios naturales}}}{Q_{\text{perd.total}}} = \frac{Q_{\text{perd.total}} - Q_{\text{aux.}}}{Q_{\text{perd.total}}}$$

Aplicando la relación anterior a los resultados de la Tabla 5.12, obtenemos una FAE del 36.5% para el periodo aquí considerado.

**Tabla 5.11:** Consumos energéticos totales y temperaturas obtenidas para el caso V.a.

Habitación	Situación	Energía auxiliar (MJ)	Ganancias internas (MJ)	T mínima	T media	T máxima
1	sur-inf.	-323.2	-	22.5	23.5	24
2	norte-inf.	-10.29	-	22.7	23.1	24
3	norte-inf.	-87.58	+86.4	22.5	23.5	24
4	central-inf.	-0.91	-	23.5	23.7	24
5	norte-sup.	-9.95	-	23	23.5	24
6	sur-sup.	-78.44	-	22.5	23.5	24
7	sur-sup.	-67.53	-	22.5	23.5	24
8	central-sup.	-5.47	-	23.3	23.8	24
9	central-sup.	-22.90	-	22.3	23.3	24

**Tabla 5.12:** Balance térmico global de la casa nº 15 en régimen termostático, caso V.a).

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-57.31 (6.0)	+268.1 (27.83)	+210.79
Ventanas	-76.98 (8.06)	+320.49 (33.27)	+243.51
Suelo	-87.39 (9.15)	+55.74 (5.78)	-31.65
Techo	-51.17 (5.36)	+195.11 (20.26)	+143.94
Infiltraciones	-40.14 (4.20)	+27.12 (2.81)	-13.02
Puente térmico	-35.83 (3.75)	+10.26 (1.06)	-25.57
Ganancias internas	-	+86.4 (8.97)	+86.4
Energía auxiliar	606.27 (63.48)	-	+606.27
Total	-955.09	+963.22	+8.13

Los flujos vienen expresados en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

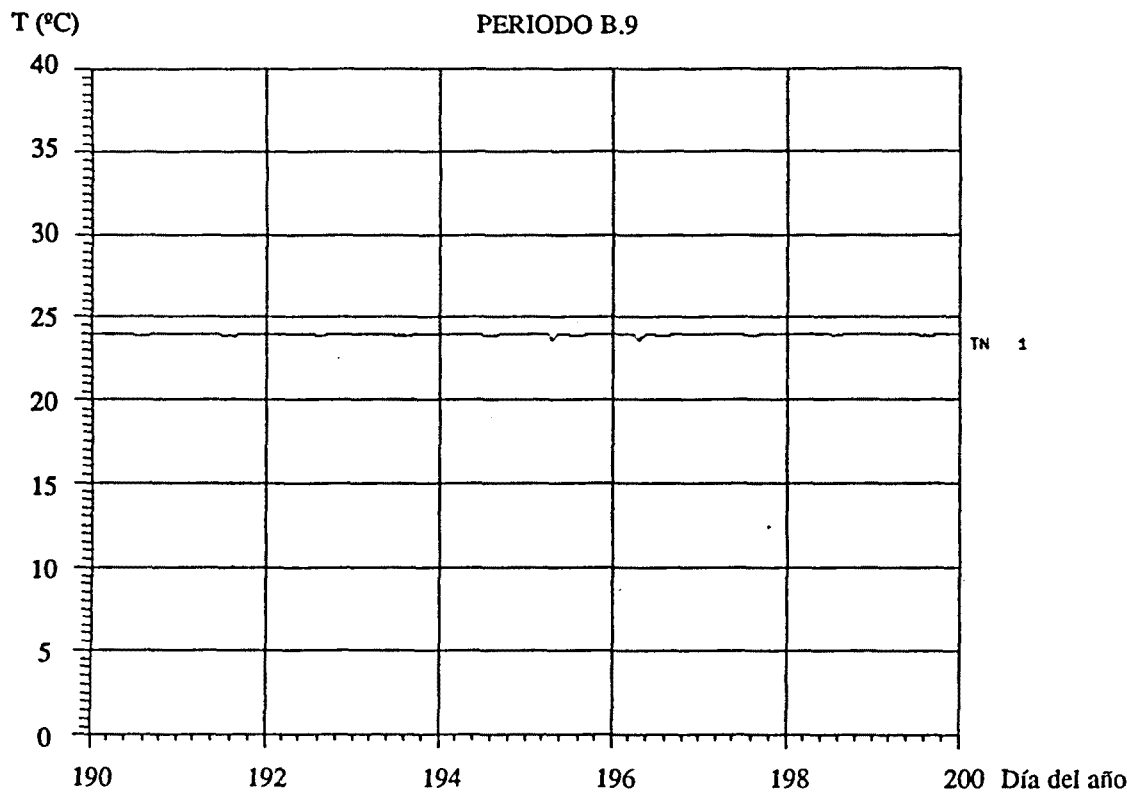


Fig.5.6a: Temperaturas simuladas en la habitación 1 para la hipótesis del caso V.a.

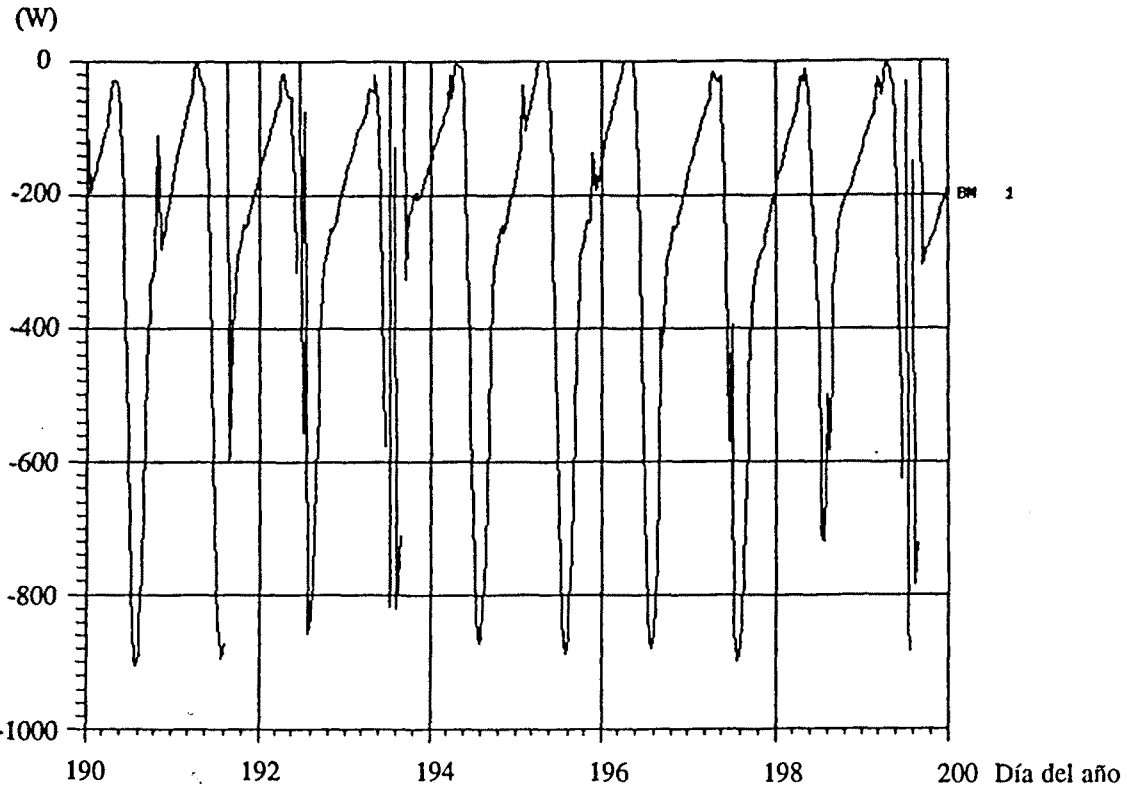


Fig.5.6b: Consumo energético en la habitación 1 para la hipótesis del caso V.a.



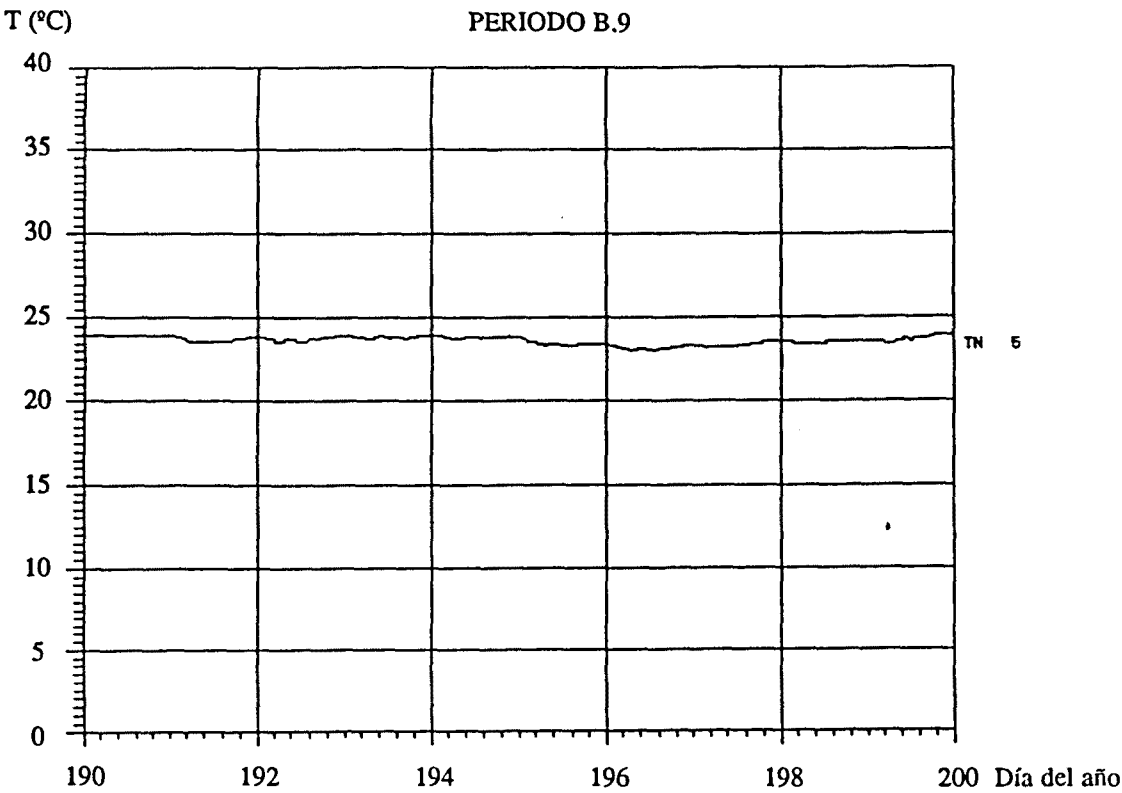


Fig.5.6c: Temperaturas simuladas en la habitación 5 para la hipótesis del caso V.a.

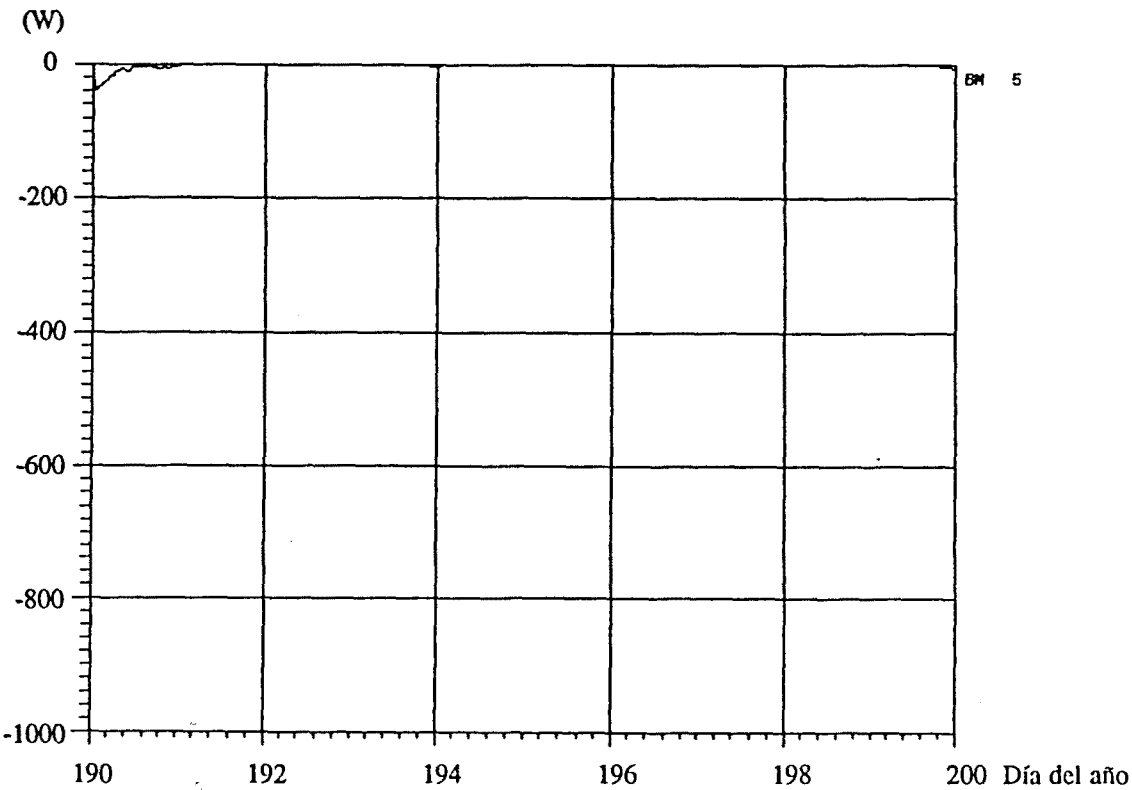


Fig.5.6d: Consumo energético en la habitación 5 para la hipótesis del caso V.a.

Caso V.b) y V.c):

En la Tabla 5.13 y 5.14 se presentan los resultados correspondientes a estos casos. Puede verse como la energía auxiliar necesaria es ahora tan sólo de 443 MJ y 310 MJ, respectivamente, lo cual supone un 52% y un 40% del total de las pérdidas. Mientras que las FAE obtenidas son del 48% y 59.8%.

**Tabla 5.13:** Consumos energéticos totales y temperaturas obtenidas para el caso V.b.

Habitación	Situación	Energía auxiliar (MJ)	Ganancias internas (MJ)	T mínima	T media	T máxima
1	sur-inf.	-263	-	23.7	24.8	25
2	norte-inf.	-2.99	-	23.2	23.9	25
3	norte-inf.	-64.74	+86.4	23.7	24.8	25
4	central-inf.	-1.30	-	24.4	24.5	25
5	norte-sup.	-4.85	-	23.7	24.3	25
6	sur-sup.	-50.21	-	23.7	24.8	25
7	sur-sup.	-44.46	-	23.7	24.8	25
8	central-sup.	-3.36	-	24.1	24.5	25
9	central-sup.	-8.10	-	23.5	24.5	25

**Tabla 5.14:** Consumos energéticos totales y temperaturas obtenidas para el caso V.c.

Habitación	Situación	Energía auxiliar (MJ)	Ganancias internas (MJ)	T mínima	T media	T máxima
1	sur-inf.	-208.5	-	25.1	25.8	26
2	norte-inf.	-	-	23.1	24.4	25.7
3	norte-inf.	-43.96	+86.4	26	25.9	26
4	central-inf.	-	-	24.7	25.3	26
5	norte-sup.	-	-	24	24.8	26
6	sur-sup.	-28.10	-	24.8	25.7	26
7	sur-sup.	-25.55	-	24.5	25.7	26
8	central-sup.	-0.24	-	24.3	25.1	26
9	central-sup.	-4.11	-	24.4	25.1	26

En la Fig.5.7 se presentan gráficamente los consumos de energía auxiliar correspondientes a los tres casos anteriores. El ajuste mediante un polinomio conduce a la ecuación

$$y = -15.35 x^2 + 915.6 x - 13737 \quad (5.2)$$

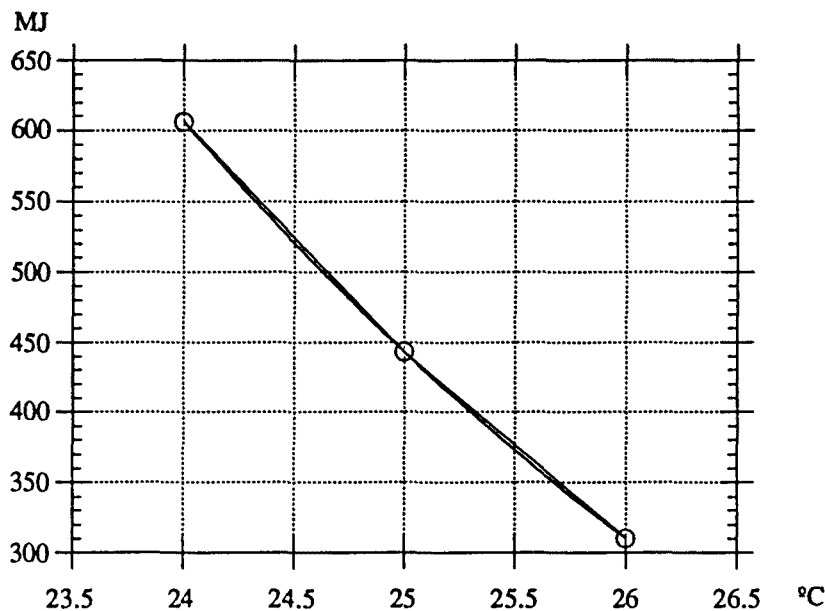


Fig.5.7: Consumo de energía auxiliar en función de la temperatura de confort interior.

Caso V.d):

En la Tabla 5.15 puede verse como el consumo de energía auxiliar obtenido en este caso es de 297 MJ. A diferencia de antes para el caso I.d), el descenso obtenido con relación a los casos de régimen termostático uniforme no es tan notable, debido al hecho de que la carga térmica más importante aquí es la de la habitación 1, que es la que queremos mantener a menor temperatura. Con todo la reducción del consumo de energía auxiliar con relación al caso V.b), en el que se establece una temperatura de confort de 25 °C en toda la casa, es importante (del 33%). La extrapolación mediante la Ec.5.2, al suponer que toda la vivienda se mantiene a 27°C da un resultado de 206 MJ. La FAE obtenida para esta situación alcanza el 61.6%.

### 5.1.1.3 Régimen de ventilación.

Tal como comentábamos al principio de esta sección, uno de los parámetros que más influyen sobre el rendimiento energético de una vivienda bioclimática, es la buena utilización que los usuarios hacen de los sistemas solares incorporados en ella. En este sentido, a continuación, vamos a analizar la influencia del buen uso de las rejillas de ventilación incorporadas a nuestra vivienda. Dos son las hipótesis supuestas, en función de si consideramos el período invernal o el estival:

Hipótesis U.a (periodo invernal).

En este caso se tratarán las rejillas que comunican el Trombe con la sala de estar-comedor (enlace 1-11 GM), las que comunican el Trombe con el falso techo por su parte sur<sup>1</sup> (enlace 22-16 VM) y las que comunican el falso techo por su parte norte con el exterior (enlace 23-99 VM). Con el fin de limitar las pérdidas nocturnas se considerará que la apertura de las dos primeras se realiza únicamente para el periodo solar (entre las 7h y las 17h, igual al que se ha supuesto para la apertura de ventanas), mientras que la última se considerará siempre cerrada.

Tabla 5.15: Consumos energéticos totales y temperaturas obtenidas para el caso V.d.

Habitación	Situación	Energía auxiliar (MJ)	Ganancias internas (MJ)	T mínima	T media	T máxima
1	sur-inf.	-277.3	-	24.7	25	25
2	norte-inf.	-	-	23.1	24.3	25.8
3	norte-inf.	-6.88	+86.4	26	26.7	27
4	central-inf.	-	-	24.6	25.3	26.2
5	norte-sup.	-	-	24.1	24.8	26.2
6	sur-sup.	-6.45	-	24.5	26.2	27
7	sur-sup.	-6.30	-	24.5	26.2	27
8	central-sup.	-	-	24.3	25.1	26.6
9	central-sup.	-	-	24.3	25.2	26.8

En la Tabla 5.16 se presentan los resultados obtenidos para esta situación, habiéndose supuesto la hipótesis del régimen termostático correspondiente al caso I.a. Comparándolos con los correspondientes al caso de referencia (Tabla 5.7) se observa la notable disminución experimentada por las perdidas por infiltración, que han pasado a reducirse en un 80% (de 132.6 MJ a 25.2 MJ), lo que implica que el consumo de energía auxiliar haya pasado de los 627 MJ anteriores a los 559 MJ actuales, que representa una reducción, sólo por este motivo, nada despreciable del 10.8%.

Hipótesis U.b (periodo estival).

En este caso se limitó la apertura de las rejillas de ventilación al periodo nocturno para facilitar de esta forma la eliminación del calor acumulado durante el periodo diurno. Para ello se manipularon las mismas rejillas que se consideraron en la hipótesis anterior, pero ahora abriéndolas tan sólo en el periodo nocturno (entre las 20h y las 6h del día siguiente). Adicionalmente se consideró en este caso, además, la apertura, para el mismo periodo nocturno, de la ventana grande de la sala de estar-comedor (enlace 1-99 VM).

Del análisis de los resultados presentados en la Tabla 5.17, en donde se ha considerado la hipótesis de régimen termostático del caso V.c, puede verse la enorme importancia que

<sup>1</sup> Es importante recordar que la función principal que debía de desempeñar el falso techo, era la de comunicar el espacio solar del Trombe con las habitaciones del piso superior situadas en la cara norte y que por problemas constructivos no llegó a realizarse.

supone la ventilación nocturna de la sala de estar-comedor. Efectivamente, ella sólo supone una pérdida de 388 MJ, lo que provoca que el consumo de energía auxiliar descienda hasta los 75 MJ, frente a los 310 MJ del caso de referencia (Tabla 5.14), lo cual representa una reducción del 75.8%.

**Tabla 5.16:** Intercambios caloríficos entre la casa nº 15 y el exterior, al considerarse un uso eficiente de las rejillas de ventilación, en el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

Elemento	Intercambio	Q saliente	Q entrante	Q sal. total	Q ent. total	Q total
Muro Trombe inferior	85-77 GM	19.60	20.77	-261.5 (15.47)	+628.06 (36.49)	+366.56
	82-53 GM	49.34	1.57			
	90-30 GM	163.9	-			
	90 EM	-	37.82			
	28 EM	-	248.1			
	1 EM	-	208.8			
	14-76 GM	28.66	111.0			
Muro Trombe superior	19-18 GM	15.51	221.6	-56.92 (3.37)	+429.4 (24.94)	+372.48
	79-71 GM	41.41	7.66			
	79 EM	-	16.66			
	94 EM	-	0.48			
	39 EM	-	91.50			
	6 EM	-	45.75			
	7 EM	-	45.75			
Pared norte	92-97 GM	6.67	-	-235.1 (13.91)	-	-235.1
	93-68 GM	13.03	-			
	91-89 GM	79.68	-			
	60-61 GM	27.40	-			
	62-63 GM	32.29	-			
	64-65 GM	76.03	-			
Suelo	28-99 GM	73.52	-	-348.42 (20.62)	-	-348.42
	31-99 GM	134.2	-			
	32-99 GM	140.7	-			
Techo	20-43 GM	334.0	-	-668.8 (39.58)	-	-668.8
	21-41 GM	334.8	-			
Infiltraciones	1-11 GM	5.83	0.44	-43.72 (2.59)	+18.46 (1.07)	-25.26
	2-99 GM	9.34	-			
	3-99 GM	5.89	-			
	5-99 GM	13.56	-			
	6-16 GM	3.94	0.68			
	7-16 GM	3.01	0.46			
	22-16 VM	2.15	16.88			
	23-99 VM	-	-			
Puente térmico	20-99 GM	75.23	0.03	-75.23 (4.45)	0.03 -	-75.20
Ganancias internas	3 EM	-	86.4	-	+86.4 (5.02)	+86.4
Energía auxiliar	H-1	-	7.98	-	+558.95 (32.47)	+558.95
	H-2	-	170.0			
	H-3	-	4.81			
	H-4	-	15.13			
	H-5	-	207.9			
	H-6	-	23.18			
	H-7	-	18.48			
	H-8	-	61.83			
	H-9	-	54.64			
Total				-1689.69	+1721.30	+31.61

**Tabla 5.17:** Intercambios caloríficos entre la casa nº 15 y el exterior al considerarse un uso eficiente de las rejillas de ventilación, en el periodo comprendido entre los días 190 y 200.

Elemento	Intercambio	Q saliente	Q entrante	Q sal. total	Q ent. total	Q total
Muro Trombe inferior	85-77 GM	4.16	19.32			
	82-53 GM	8.74	11.05			
	90-30 GM	34.07	2.61			
	90 EM	-	23.98	-47.07	+437.86	+390.79
	28 EM	-	125.6	(5.74)	(48.76)	
	1 EM	-	110.8			
	14-76 GM	0.10	144.5			
Muro Trombe superior	19-18 GM	9.76	79.0			
	79-71 GM	19.07	6.05			
	79 EM	-	3.59	-28.83	+121.82	+92.99
	94 EM	-	-	(3.52)	(13.57)	
	39 EM	-	16.59			
	6 EM	-	8.29			
	7 EM	-	8.29			
Pared norte	92-97 GM	1.79	0.35			
	93-68 GM	3.42	0.45			
	91-89 GM	17.62	7.08	-56.24	+9.21	-47.03
	60-61 GM	4.94	0.68	(6.86)	(1.02)	
	62-63 GM	7.44	0.33			
	64-65 GM	21.03	0.32			
Suelo	28-99 GM	12.81	6.29			
	31-99 GM	38.52	20.74	-89.69	+53.74	-35.95
	32-99 GM	38.36	26.71	(10.94)	(5.98)	
Techo	20-43 GM	32.85	84.41	-60.82	+174.6	+113.78
	21-41 GM	27.97	90.19	(7.42)	(19.44)	
Infiltraciones	1-11 GM	0.02	0.78			
	2-99 GM	1.78	1.13			
	3-99 GM	1.72	0.39			
	5-99 GM	3.07	1.45	-34.79	+5.04	-29.75
	6-16 GM	1.39	0.74	(4.24)	(0.56)	
	7-16 GM	1.05	0.55			
	22-16 VM	8.02	-			
	23-99 VM	17.74	-			
Ventilación	1-99 VM	388.6	-	-388.6	-	-388.6
				(47.40)	-	
Puente térmico	20-99 GM	38.22	9.30	-38.22	+9.30	-28.92
				(4.66)	(1.03)	
Ganancias internas	3 EM	-	86.4	-	+86.4	+86.4
					(9.62)	
Energía auxiliar	H-1	43.19				
	H-2	-				
	H-3	9.83				
	H-4	-				
	H-5	-		-75.59	-	-75.59
	H-6	11.36	-	(9.22)	-	
	H-7	11.16				
	H-8	-				
	H-9	0.05				
Total				-819.85	+897.97	+78.12

Los flujos caloríficos vienen expresados en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna. Se ha considerado que la apertura de las ventanas se realiza entre las 7h y las 17h.

5.1.2 Influencia de distintos parámetros de diseño.

Los estudios sobre el diseño se basan en el análisis de distintas soluciones arquitectónicas, viendo sus implicaciones sobre el comportamiento térmico global del edificio, con la finalidad de hallar la mejor alternativa posible. En general, se basan en el análisis de la influencia de distintas variables geométricas o de los materiales constructivos del edificio.

5.1.2.1 Aislamiento en el techo.

En una inspección visual realizada en la casa nº 15 durante el año 1991 se observó que el aislamiento del techo estaba totalmente deteriorado, es por esta razón que en el modelo físico-matemático presentado en el Capítulo anterior, no se consideró su existencia. Ya que éste es un elemento imprescindible para la conservación de la energía en un edificio, y en este sentido, los resultados obtenidos en el Apartado 4.6 lo han confirmado (efectivamente, para el caso contrastado en régimen de fluctuación libre, se ha encontrado que el 43% del total de las pérdidas durante el invierno y el 28% del total de las ganancias durante el verano se producen a través del techo), éste fue el primero de los ensayos realizados en este apartado sobre consideraciones de diseño.

Tabla 5.18: Balance térmico global de la casa nº 15 en régimen de fluctuación libre, con apertura de ventanas y 5 cm de aislamiento en el techo, para los días 340-350.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-175.9 (16.28)	+376.12 (31.81)	+200.22
Ventanas	-241.77 (22.38)	+702.96 (59.45)	+461.19
Suelo	-247.15 (22.88)	+1.80 (0.15)	-245.35
Techo	-176.42 (16.33)	-	-176.42
Infiltraciones	-139.76 (12.94)	+15.19 (1.28)	-124.57
Puente térmico	-99.31 (9.19)	-	-99.31
Ganancias internas	-	+86.4 (7.3)	+86.4
Total	-1080.31	+1182.47	+102.16

Los flujos vienen expresados en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

Régimen fluctuante.

En las Tabla 5.18 y 5.19 se muestran los resultados del balance térmico global, correspondientes a los dos periodos considerados, obtenidos en la simulación de la casa nº 15 en régimen de fluctuación libre y apertura de ventanas, pero considerando ahora la existencia de un espesor de 5 cm de poliestireno expandido en el techo de la casa (justo por encima del forjado del piso superior). Como puede verse, el peso relativo de las pérdidas a través del techo, en el periodo de invierno (Tabla 5.18), ha experimentado un descenso significativo, al pasar del 37.6% (Tabla 5.4), para el caso sin aislamiento, al 16.3% para el caso con

aislamiento (en valores absolutos, de 440 MJ a 176 MJ). En cambio, para el periodo de verano, el descenso de las ganancias a través del techo no es tan importante, de 40 MJ pasamos a 23 MJ . En la Fig.5.8 se presentan estos mismos resultados gráficamente.

**Tabla 5.19:** Balance térmico global de la casa nº 15 en régimen de fluctuación libre, apertura de ventanas y 5 cm de aislamiento en el techo, para los días 190-200.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-112.92 (22.92)	+164.15 (25.46)	+51.23
Ventanas	-133.79 (27.15)	+304.07 (47.16)	+170.28
Suelo	-130.29 (26.44)	+30.71 (4.76)	-99.58
Techo	-18.54 (3.76)	+41.54 (6.44)	+23
Infiltraciones	-57.79 (11.73)	+11.84 (1.84)	-45.95
Puente térmico	-39.04 (7.92)	+6.06 (0.94)	-32.98
Ganancias internas	- -	+86.4 (13.4)	+86.4
Total	-492.73	+644.77	+152.04

Los flujos vienen expresados en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

**Tabla 5.20:** Temperaturas en °C de la casa nº 15 en régimen de fluctuación libre, apertura de ventanas y 5 cm de aislamiento en el techo.

Hab. nº	Situación	Días 340-350			Días 190-200		
		Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.
1	sur inf.	15.9	20.0	27.7	26.1	28.6	32.4
2	norte inf.	10.8	12.6	13.5	24.0	25.2	27.1
5	norte sup.	11.6	13.0	13.6	24.6	25.5	27.0
6	sur sup.	15.7	20.2	26.0	25.3	27.0	29.4
11	Trombe inf.	5.44	13.5	31.6	16.6	25.9	37.4
16	Trombe sup.	8.44	16.2	35.9	17.9	24.9	33.2

Se ha considerado que la apertura de las ventanas se realiza para el periodo de invierno entre las 7h y las 17h, y para el periodo de verano entre les 6h y las 20h (hora solar).

La traducción de estos resultados en términos de temperaturas puede apreciarse en la Tabla 5.20, donde se observan, con relación al mismo caso pero sin aislamiento (Tabla 5.1), incrementos en las temperaturas medias de entre 1°C y 2°C para el periodo de invierno, mientras que para el periodo de verano, no se producen descensos significativos en las



temperaturas, lo cual es debido al hecho, comentado anteriormente, de que los flujos predominantes en esta época del año son los que tienen lugar a través de las ventanas y las paredes y no a través del techo.

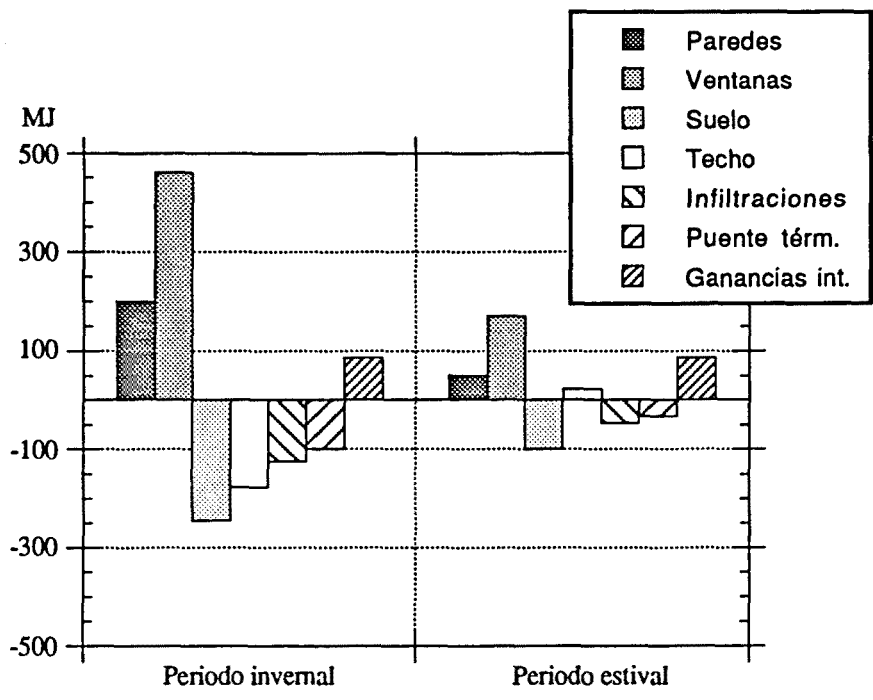


Fig.5.8: Representación de los resultados del balance térmico global de la casa nº 15 con apertura de ventanas y aislamiento en el techo.

Régimen termostático.

En las Tablas 5.21 y 5.22 se presentan los resultados para los dos periodos considerados, correspondientes a la misma situación de aislamiento en el techo pero ahora en régimen termostático. Para el periodo invernal (Tabla 5.21), en donde se ha considerado la hipótesis del caso I.a, podemos ver que el consumo de energía auxiliar para mantener esas condiciones ha disminuido notablemente, 405 MJ frente a los 627 MJ del mismo caso sin aislamiento. La mejora en términos de FAS es del 67.8% frente al 60.2%. En cambio para el periodo estival de la Tabla 5.22, en donde se ha considerado la hipótesis del caso V.c, a pesar de que el consumo de energía auxiliar también ha disminuido al pasar a los 276 MJ, frente a los 310 MJ del mismo caso sin aislamiento, la FAE disminuye ligeramente al ser del 58.7% frente al 59.8% anterior<sup>1</sup>.

En la Fig.5.9 se ha estudiado, para el periodo invernal, la forma cómo disminuye el consumo de energía auxiliar al aumentar el espesor del aislamiento en el techo. Se observa como espesores superiores a los 10 cm tienen, ya, una incidencia marginal muy pequeña sobre el consumo de energía auxiliar.

<sup>1</sup> Este ligero descenso de la FAE, viene dado por el hecho de que en su evaluación se toma como referencia el calor total perdido y, en este caso, el aislamiento hace que éste disminuya en una proporción mayor que, en la que lo hace la energía auxiliar consumida.

**Tabla 5.19:** Balance térmico global de la casa nº 15 en régimen termostático (caso I.a) y aislamiento en el techo.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-239.72 (16.36)	+321.6 (21.07)	+81.88
Ventanas	-316.33 (21.59)	+609.48 (39.93)	+293.15
Suelo	-352.6 (24.06)	- -	-352.6
Techo	-236.4 (16.13)	- -	-236.4
Infiltraciones	-182.86 (12.48)	+12.53 (0.82)	-170.33
Puente térmico	-111.9 (7.63)	- -	-111.9
Ganancias internas	- -	+86.4 (5.66)	+86.4
Energía auxiliar	- -	+404.96 (26.53)	+404.96
Total	-1465.42	+1526.47	+61.05

Los flujos vienen expresados en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

**Tabla 5.20:** Balance térmico global de la casa nº 15 en régimen termostático (caso V.c) y aislamiento en el techo.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-85.25 (7.85)	+213.63 (26.79)	+128.38
Ventanas	-103.25 (15.43)	+308.43 (38.68)	+205.18
Suelo	-108.67 (16.24)	+41.27 (5.17)	-6.74
Techo	-13.24 (1.98)	+51.26 (6.43)	+38.02
Infiltraciones	-47.61 (7.11)	+18.5 (2.32)	-29.11
Puente térmico	-35.12 (5.25)	+77.87 (9.76)	+42.75
Ganancias internas	- -	+86.4 (10.83)	+86.4
Energía auxiliar	276 (41.25)	- -	-276
Total	-669.14	+797.36	+128.22

Los flujos vienen expresados en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

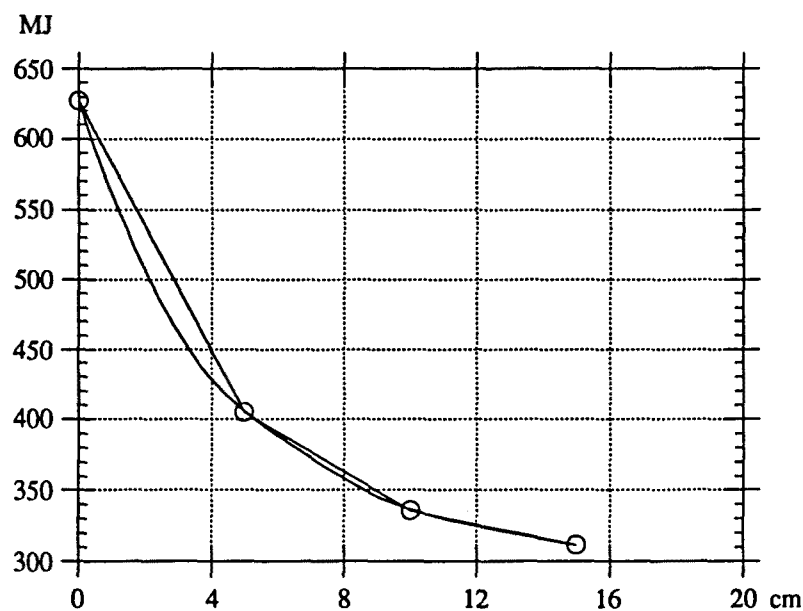


Fig.5.9: Variación del consumo de energía auxiliar invernal con el espesor de aislamiento.

5.1.2.2 Patologías diversas

Los resultados correspondientes a los intercambios existentes, a través del volumen de control, entre distintos elementos de la casa nº 15 y el ambiente exterior, presentados en las Tabla 5.2 y 5.3, permiten observar cómo alguno de éstos, correspondientes a componentes accesorios del edificio, presentan valores relativamente elevados. Entre ellos destacaremos dos: el intercambio existente a través de la mampara de aluminio que envuelve la ventana principal del muro Trombe (nodos 82 y 53) y el que hay a través de la ventana y de la puerta acristalada existentes en la cocina (nodos 91 y 89). Ambos, que son netamente negativos, podían haberse limitado con tan sólo un pequeño esfuerzo económico adicional. Es por ello, que a continuación analizaremos la influencia de haber dispuesto 5 cm de aislamiento de poliestireno expandido por detrás de la mampara de aluminio y la de haber utilizado ventanas de doble vidrio en la cocina.

En la Tabla 5.23 se presentan los resultados obtenidos sólo para el periodo invernal. Con el fin de poder comparar con más facilidad los resultados en función del consumo de energía auxiliar, se ha realizado la simulación bajo la hipótesis del régimen termostático del caso I.a. Comparando estos resultados con los obtenidos para el caso de referencia, puede observarse como el valor de los intercambios que estamos considerando, disminuye significativamente; así el calor perdido a través de la mampara de aluminio ha pasado de 48.3 MJ a 9.4 MJ, mientras que el perdido por las superficies acristaladas de la cocina ha pasado de 79.5 MJ a 15.5 MJ. Desde el punto de vista del consumo de energía auxiliar la disminución representa el 11.3% del valor total con relación al caso de partida (de 627.3 MJ a 556.5 MJ), lo cual es, evidentemente, un valor nada despreciable frente a la pequeña inversión que habría que hacer para solventar estos puntos fríos.

**Tabla 5.23:** Intercambios caloríficos entre la casa nº 15 y el exterior al limitarse las patologías observadas, en el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

Elemento	Intercambio	Q saliente	Q entrante	Q sal. total	Q ent. total	Q total
Muro Trombe inferior	85-77 GM	20	20.63	-225.57 (13.4)	+624.71 (36.37)	+399.14
	82-53 GM	9.36	0.26			
	90-30 GM	165.5	-			
	90 EM	-	37.82			
	28 EM	-	248.1			
	1 EM	-	208.8			
	14-76 GM	30.71	109.1			
Muro Trombe superior	19-18 GM	14.36	223.7	-55.45 (3.29)	+431.5 (25.12)	+376.05
	79-71 GM	41.09	7.66			
	79 EM	-	16.66			
	94 EM	-	0.48			
	39 EM	-	91.50			
	6 EM	-	45.75			
	7 EM	-	45.75			
Pared norte	92-97 GM	6.70	-	-170.64 (10.13)	-	-170.64
	93-68 GM	12.97	-			
	91-89 GM	15.45	-			
	60-61 GM	27.69	-			
	62-63 GM	32.45	-			
	64-65 GM	75.38	-			
Suelo	28-99 GM	74.30	-	-354.2 (21.04)	-	-354.2
	31-99 GM	134.9	-			
	32-99 GM	145.0	-			
Techo	20-43 GM	332.1	-	-650.3 (38.62)	-	-650.3
	21-41 GM	318.2	-			
Infiltraciones	1-11 GM	22.40	0.43	-152.92 (9.08)	+18.59 (1.08)	-134.33
	2-99 GM	9.34	-			
	3-99 GM	5.91	-			
	5-99 GM	13.57	-			
	6-16 GM	3.84	0.68			
	7-16 GM	2.94	0.47			
	22-16 VM	14.29	17.01			
	23-99 VM	80.63	-			
Puente térmico	20-99 GM	74.65	-	-74.65 (4.93)	-	-74.65
Ganancias internas	3 EM	-	86.4	-	+86.4 (5.03)	+86.4
Energía auxiliar	H-1	-	2.20	-	+556.48 (32.4)	+556.48
	H-2	-	127.9			
	H-3	-	3.12			
	H-4	-	13.94			
	H-5	-	229.3			
	H-6	-	23.86			
	H-7	-	19.07			
	H-8	-	71.06			
	H-9	-	66.03			
Total				-1683.73	+1717.68	+33.95

Los flujos caloríficos vienen expresados en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna. Se ha considerado que la apertura de las ventanas se realiza entre las 7h y las 17h.

## 5.2 Simulación de una casa con invernadero adosado.

Dentro del estudio de la influencia de cómo distintos parámetros de diseño afectan al comportamiento térmico de la casa nº 15, podíamos habernos planteado la posibilidad de utilizar otros sistemas de captación solar distintos al de muro Trombe y entre ellos la sustitución de ese sistema por otro de invernadero adosado. Por su especial interés y por ser ésta una de las alternativas planteadas en el diseño del conjunto bioclimático de Begues, es lo que haremos a continuación.

El estudio planteado consiste, concretamente, en analizar el hecho de sustituir el muro Trombe por un invernadero adosado, conservando toda la geometría interior así como los materiales empleados en la construcción del edificio. En la Fig. 5.10 pueden verse las modificaciones realizadas en la planta de nuestro edificio, la cual coincide con la de las viviendas nº 18-20, existentes en el campo bioclimático de Begues. Los cambios realizados afectan únicamente a la ampliación del espacio solar, de forma que éste se convierte ahora en un espacio habitable. Sin embargo, ocurren, simultáneamente, dos cambios derivados del anterior, que tienen una nada despreciable repercusión en el comportamiento térmico del edificio. En primer lugar y a diferencia de la casa nº 15, la ventana de la sala de estar-comedor pasa a ser ahora interior al espacio solar y, en segundo lugar, el voladizo de la fachada sur aumenta su longitud de forma considerable al pasar a convertirse en el techo del invernadero.

Para el estudio de esta variante se ha conservado básicamente la descomposición nodal realizada anteriormente para la casa nº 15 y, con el fin de no perturbar la comparación entre las dos soluciones, sólo se han introducido (Fig. 5.10) aquellas modificaciones necesarias para el análisis de la nueva situación.

Al igual que hicimos para la casa con muro Trombe, el estudio de las diversas cuestiones relativas al comportamiento térmico de la casa con invernadero adosado, se han reunido en dos grupos: 1) estrategias de utilización y 2) parámetros de diseño.

### 5.2.1 Influencia de distintas estrategias de utilización.

#### 5.2.1.1 Apertura de ventanas.

Por ser la situación usual en una vivienda se ha considerado en primer lugar, y como caso de referencia, la simulación de la casa con invernadero adosado bajo la hipótesis de apertura de las persianas durante el día, considerándose las mismas que adoptamos para la casa Trombe estudiada en el apartado anterior.

En las Figs. 5.11 pueden verse los perfiles de temperatura correspondientes a la simulación en régimen de fluctuación libre para el periodo invernal. Comparándolos con los de la casa con muro Trombe de la Fig. 5.1, puede verse como las diferencias son prácticamente imperceptibles por lo que hace referencia a las habitaciones norte, mientras que para las habitaciones sur, sí puede observarse como, ahora, las máximas son algo inferiores, lo cual puede atribuirse a la existencia, en este caso, de un mayor sombreado en la fachada sur debido a la mayor longitud del voladizo.

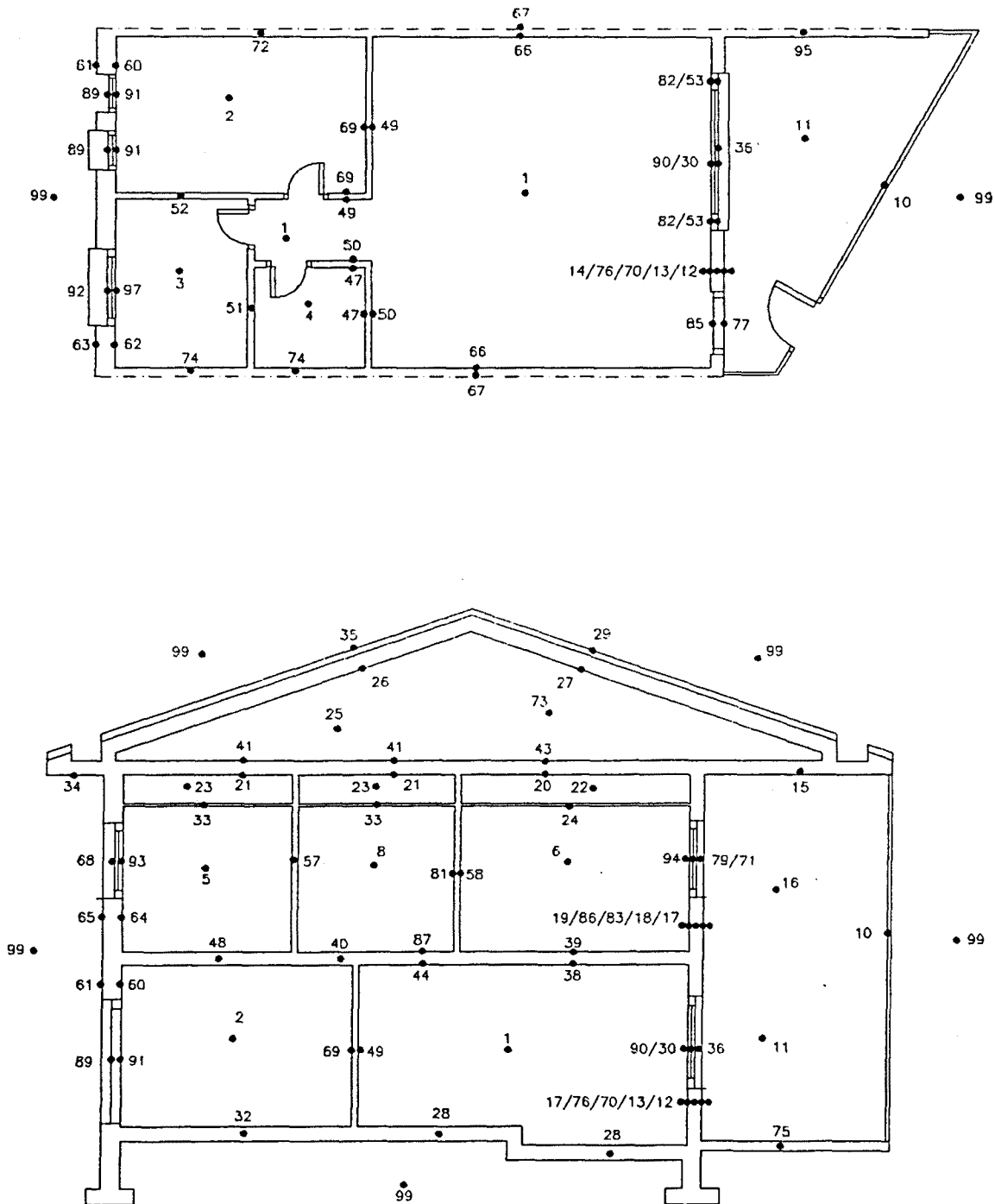


Fig.5.10: Planos y descomposición nodal de las casas con invernadero adosado del conjunto bioclimático de Begues nº 18-20.

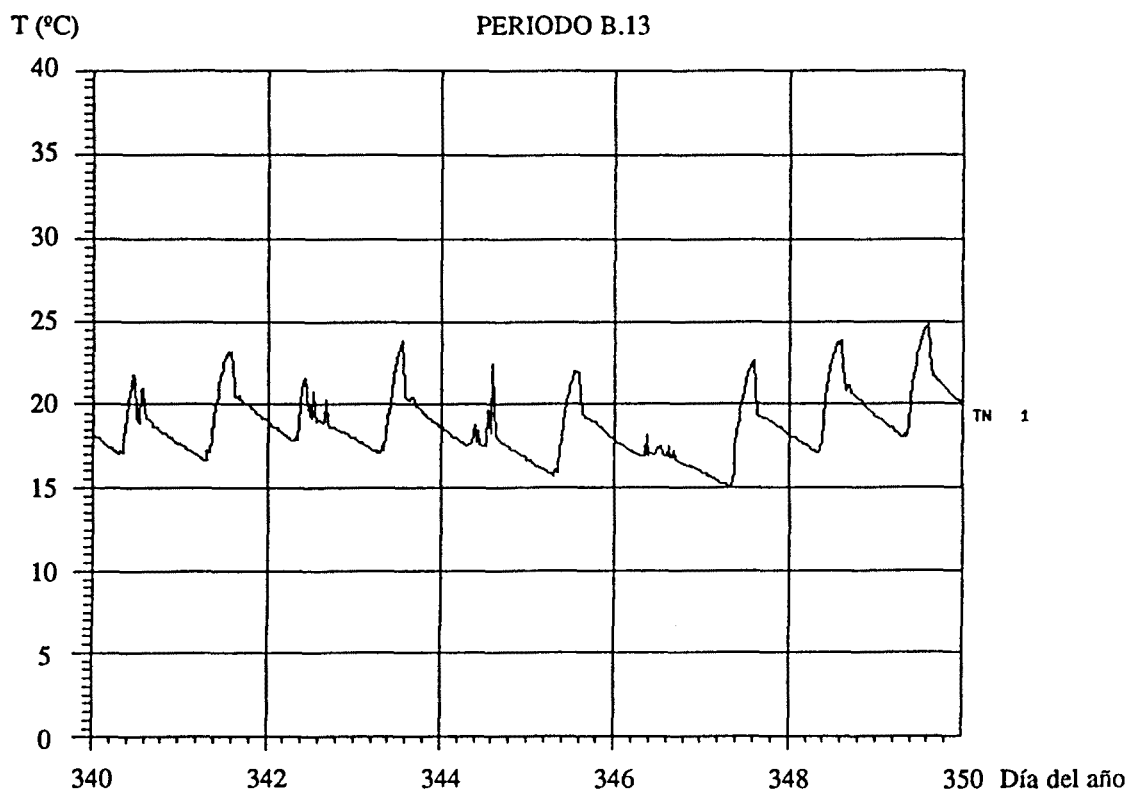


Fig.5.11a: Temperaturas simuladas en el comedor para la hipótesis de apertura de ventanas.

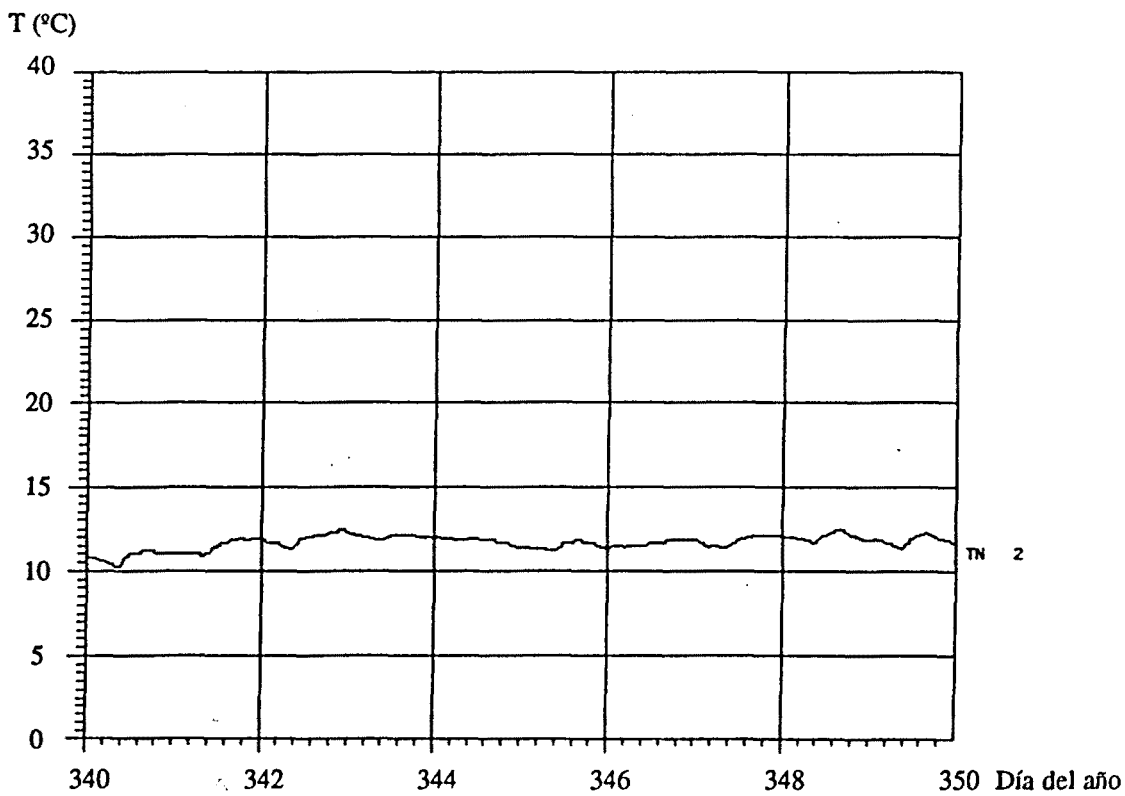


Fig.5.11b: Temperaturas simuladas en la cocina para la hipótesis de apertura de ventanas.

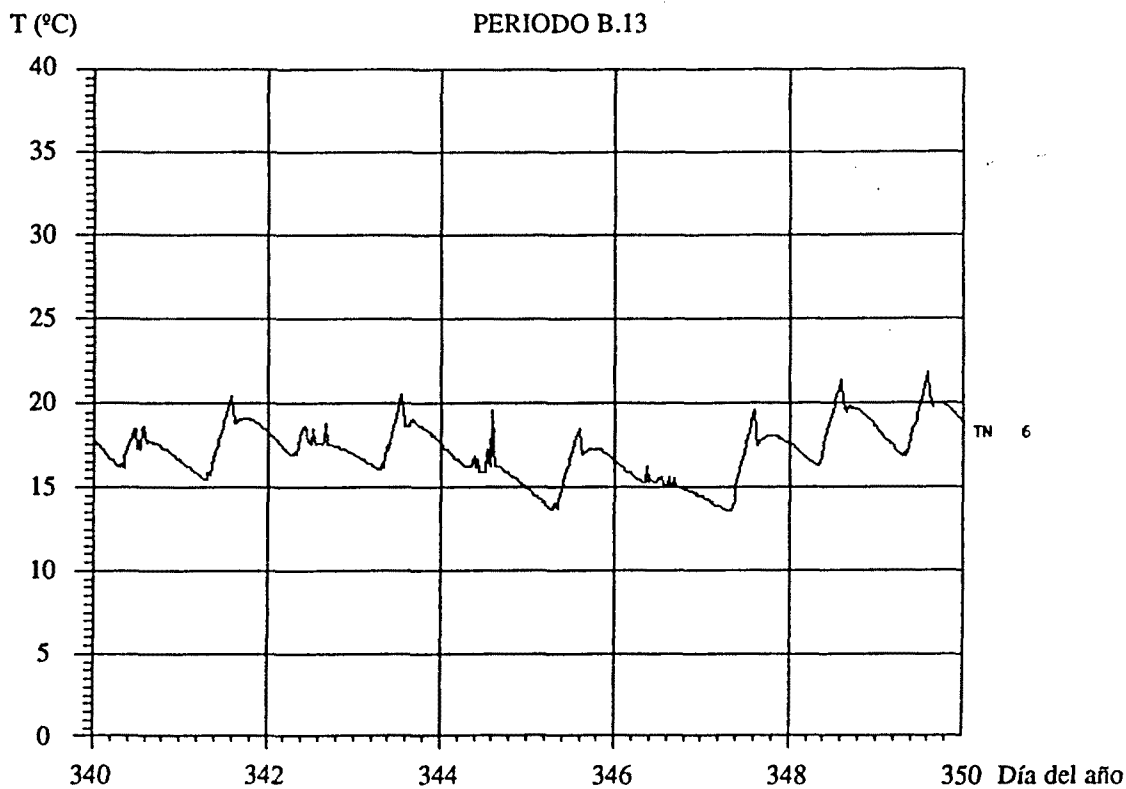


Fig.5.11c: Temperaturas simuladas en la habitación 6 para la hipótesis de apertura de ventanas.

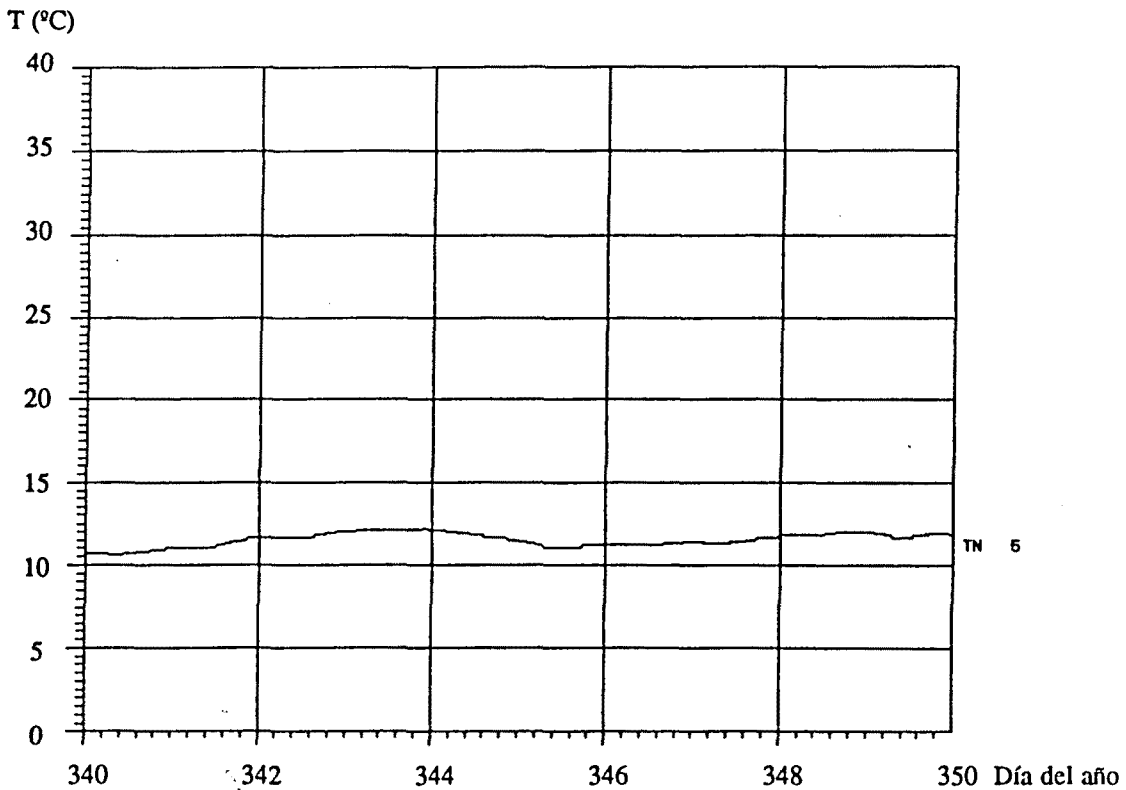


Fig.5.11d: Temperaturas simuladas en la habitación 5 para la hipótesis de apertura de ventanas.



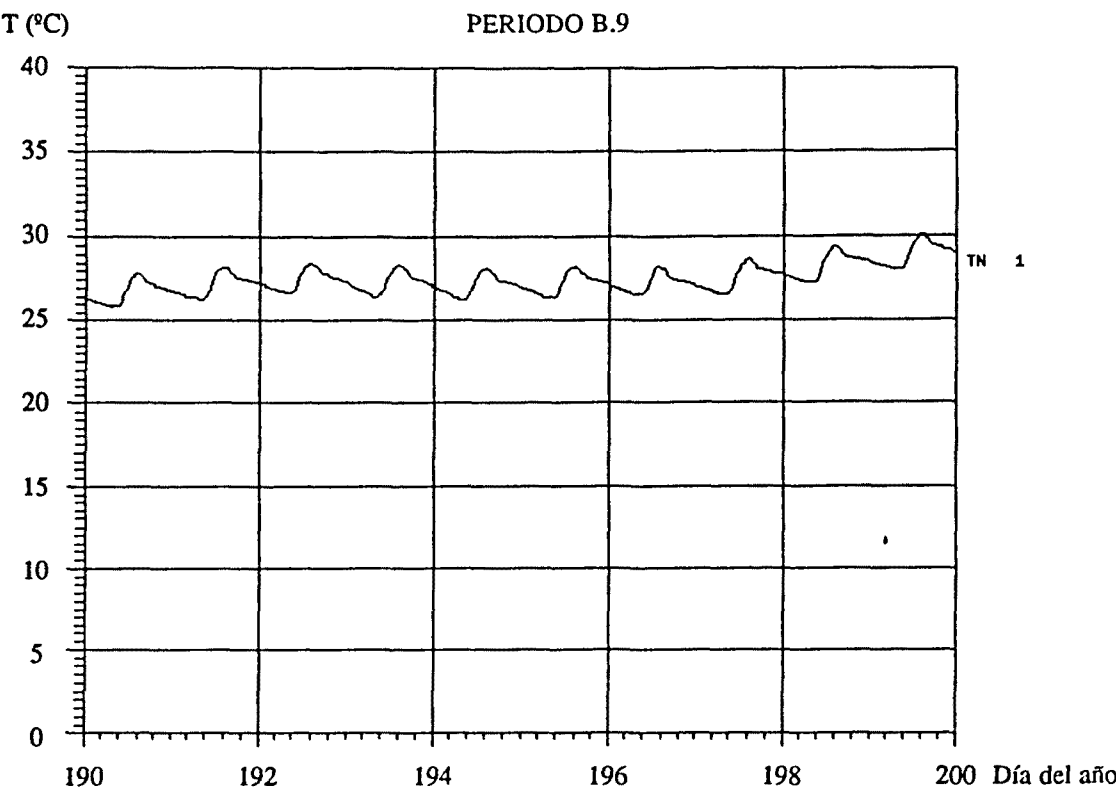


Fig.5.12a: Temperaturas simuladas en el comedor para la hipótesis de apertura de ventanas.

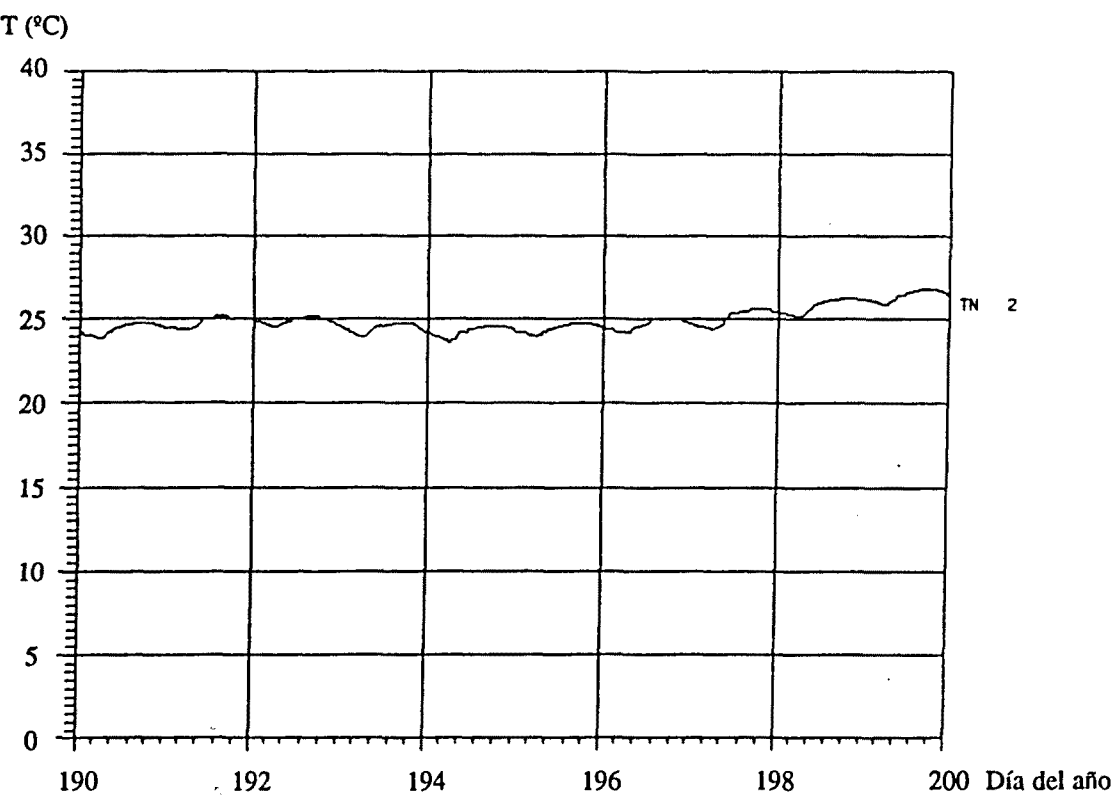


Fig.5.12b: Temperaturas simuladas en la cocina para la hipótesis de apertura de ventanas.

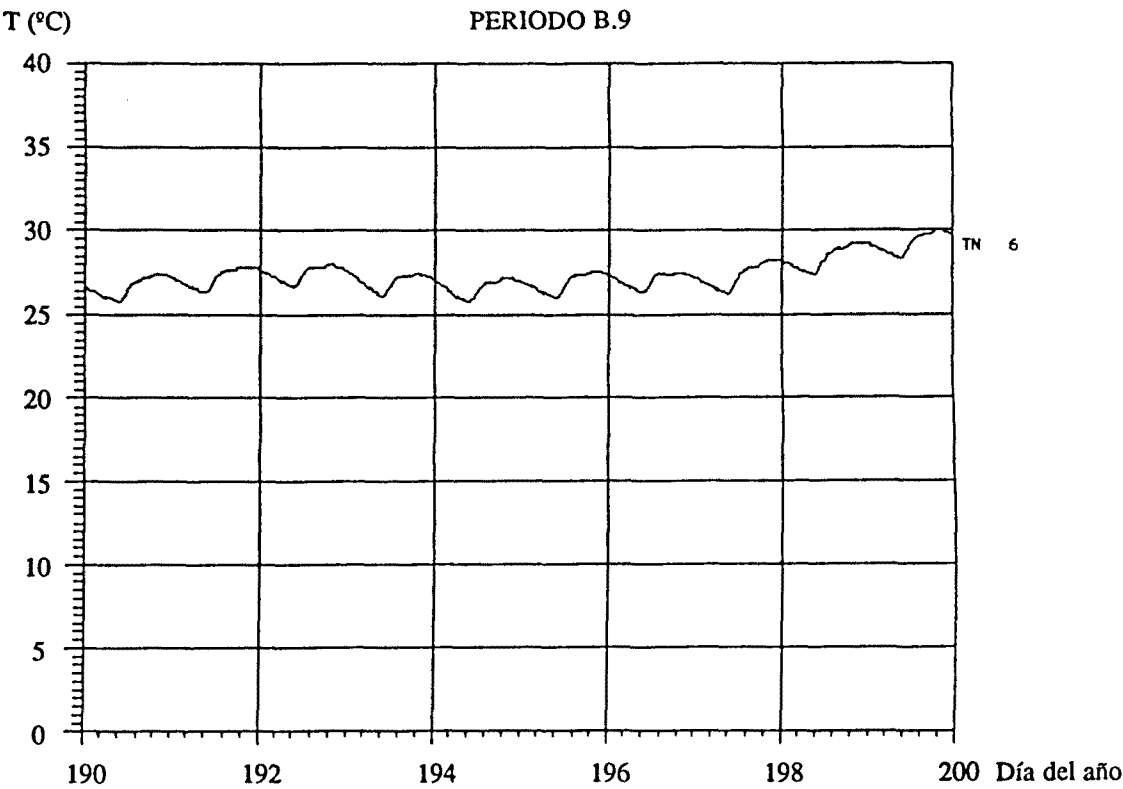


Fig.5.12c: Temperaturas simuladas en la habitación 6 para la hipótesis de apertura de ventanas.

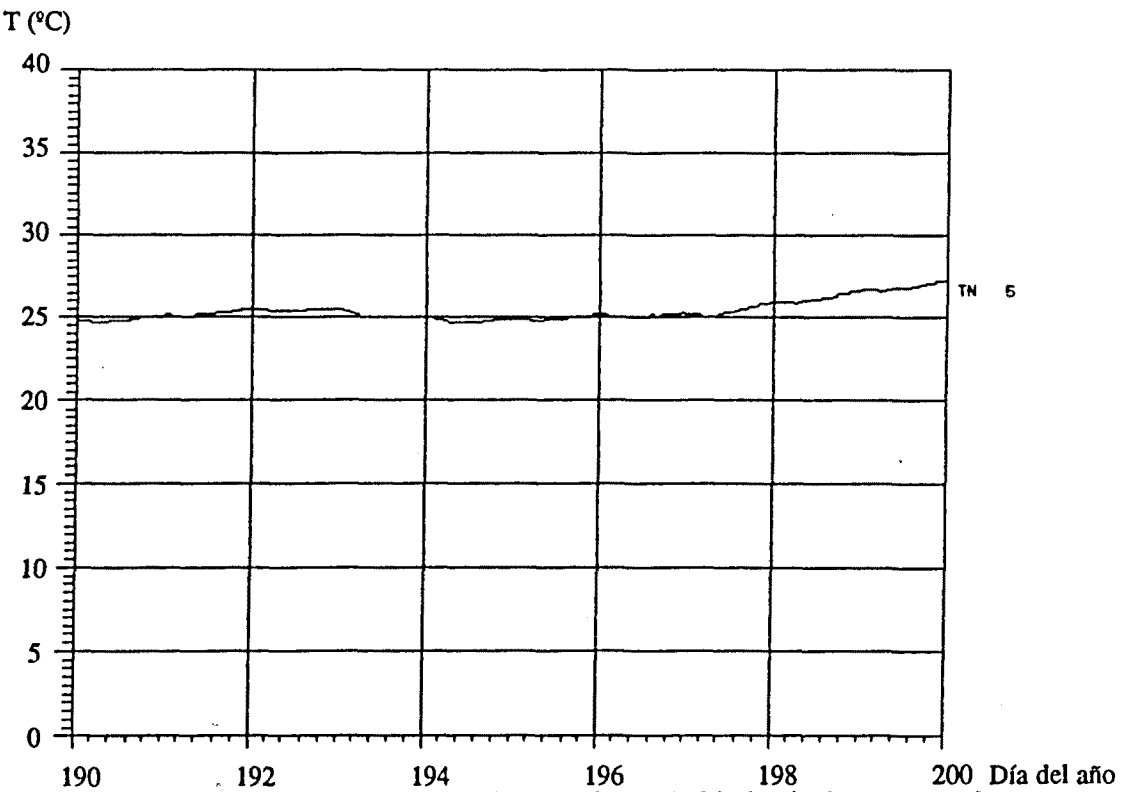


Fig.5.12d: Temperaturas simuladas en la habitación 5 para la hipótesis de apertura de ventanas.

En la Tabla 5.24 se presentan, también para el periodo invernal, los resultados de los distintos intercambios caloríficos habidos a través del volumen de control considerado, que coincide con el elegido para la casa nº 15. Comparando estos resultados con los obtenidos para la misma situación en la casa con muro Trombe (Tabla 5.2), pueden destacarse varios hechos. En primer lugar, y para el muro inferior, se observa como al encontrarse ahora la ventana de la sala de estar dentro del espacio solar (cosa que como ya hemos dicho no sucedía en el muro Trombe), tiene lugar un descenso en las ganancias directas (de 662 MJ a 570 MJ), sin embargo, ese efecto se ve prácticamente compensado por un descenso del mismo orden en las pérdidas ocurridas a través de esa ventana (de 134 MJ a 68 MJ), debido al hecho de que ahora lo son hacia el espacio solar y no hacia el exterior, como ocurría para la casa Trombe<sup>1</sup>. El segundo de los hechos a destacar hace referencia a la parte superior del mismo muro. Efectivamente, puede observarse como en este caso, contrariamente al anterior, sí existe una diferencia importante en el calor ganado a favor de la casa con muro Trombe (de 477 MJ ganados frente a 366 MJ). Su explicación hay que buscarla en la mayor profundidad que el voladizo de ese muro tiene en el invernadero, llegando a sombrear de forma notable, esa parte del muro superior con sus correspondientes ventanas. Por último, puede destacarse también, el ligero descenso del calor perdido a través del suelo del invernadero, debido al hecho de que el suelo del comedor, no está, ahora, directamente en contacto con el exterior, a causa de la presencia de la solera del invernadero, que limita sus pérdidas. Resumiendo, en términos globales podemos ver que se produce un descenso en el calor ganado que no se ve totalmente compensado por un descenso equivalente en el calor perdido, con la consiguiente pérdida de calor acumulado, que ha pasado de 82 MJ, en el caso de la casa con muro Trombe, a 18 MJ, en la situación actual. Hecho que, como veremos más adelante, tiene, también, su repercusión en un descenso de las temperaturas.

En las Figs. 5.12 se presentan los perfiles de temperaturas correspondientes a la misma situación para el periodo de verano. Puede verse, al compararlos con los de la casa Trombe de la Fig.5.2, que igual que ocurría para el periodo invernal, se produce un descenso de las máximas debido al efecto de sombreadamiento producido por la mayor longitud del voladizo.

En la Tabla 5.25 se presentan, también para el periodo estival, los resultados de los intercambios caloríficos habidos con el exterior. Comparando estos resultados con los obtenidos para la misma situación en la casa Trombe en Tabla 5.3, se siguen observando los mismos hechos comentados ya para el periodo invernal, aunque el resultado final, ahora, es distinto. Efectivamente, para la parte inferior del muro, puede observarse como se produce un descenso en la ganancia neta de calor para el caso del invernadero (de 244 MJ a 147 MJ), pues ahora el descenso del calor ganado no puede ser compensado por el descenso del calor perdido (la explicación de que ello sea así, deberíamos de buscarla otra vez en la mayor longitud del voladizo del invernadero, que afecta en este periodo estival al aporte solar sobre esta parte del muro). En cambio, para el muro superior, y a diferencia del periodo invernal, la ganancia neta es favorable ahora al invernadero (de 49 MJ pasamos a 87 MJ), pues si bien las ganancias directas son similares (en este caso, los dos muros están sombreados totalmente por los voladizos), no lo son las indirectas, pues la temperatura del invernadero es mayor que la del muro Trombe. El mismo hecho justificaría, también, el descenso experimentado por las pérdidas por infiltración. En términos globales, se constata, tal como sucedía para el periodo invernal, un descenso del calor ganado, no compensado por el descenso del calor perdido, que comporta un descenso, también, en la energía acumulada por el edificio, aunque ahora esto favorece a nuestros intereses, al traducirse en un nuevo descenso de las temperaturas en este periodo estival.

---

<sup>1</sup> En este sentido, parecería lógico concluir, que el hecho de incorporar esa ventana dentro del espacio solar, en la casa con muro Trombe, no tendría una repercusión importante de cara a las ganancias solares.

**Tabla 5.24:** Intercambios caloríficos a través del volumen de control de la casa con invernadero adosado, con apertura de ventanas, en el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

Elemento	Intercambio	Q saliente	Q entrante	Q sal. total	Q ent. total	Q total
Muro sur inferior	85-77 GM	10.07	24.21	-101.44 (9.93)	+570.18 (54.82)	+468.74
	82-53 GM	18.86	2.63			
	90-30 GM	67.67	6.91			
	90 EM	-	28.63			
	28 EM	-	197.7			
	1 EM	-	158.4			
	14-76 GM	4.84	151.7			
Muro sur superior	19-18 GM	1.85	199.3	-33.4 (3.27)	+366.20 (35.21)	+332.80
	79-71 GM	31.55	4.99			
	79 EM	-	13.47			
	94 EM	-	0.48			
	39 EM	-	73.98			
	6 EM	-	36.98			
	7 EM	-	36.98			
Pared norte	92-97 GM	4.43	-	-129.68 (12.70)	-	-129.68
	93-68 GM	7.23	-			
	91-89 GM	39.11	-			
	60-61 GM	14.72	-			
	62-63 GM	21.27	-			
	64-65 GM	42.92	-			
Suelo	28-99 GM	29.76	-	-191.50 (18.75)	+3.31 (0.31)	-188.19
	31-99 GM	86.05	0.65			
	32-99 GM	75.69	2.66			
Techo	20-43 GM	258.6	-	-420.50 (41.17)	-	-420.50
	21-41 GM	161.9	-			
Infiltraciones	1-11 GM	11.36	2.27	-76.50 (7.49)	+13.90 (1.34)	-62.60
	2-99 GM	4.30	0.03			
	3-99 GM	3.91	-			
	5-99 GM	6.10	0.06			
	6-16 GM	2.53	0.48			
	7-16 GM	1.95	0.32			
	22-16 VM	9.60	10.18			
	23-99 VM	36.75	0.56			
Ganancias internas	3 EM	-	86.4	-	+86.4 (8.30)	+86.4
Total				-953.02	+1039.99	+86.97

Todos los flujos en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna. Se ha considerado que la apertura de las ventanas se realiza entre las 7h y las 17h.

Efectivamente, comparando los resultados correspondientes a las temperaturas medias, máximas y mínimas de la Tabla 5.26, obtenidos ahora para la casa con invernadero, con los correspondientes a los obtenidos para la casa Trombe (Tabla 5.1), puede apreciarse un ligero descenso de las temperaturas medias invernales para el caso del invernadero, junto con otro ligero descenso para las temperaturas medias estivales. En general, se aprecia como para la casa con invernadero, las temperaturas extremas (máximas y mínimas) tienen, respecto a las encontradas para la casa Trombe, una desviación menor con relación a las medias, lo cual seguramente tiene su explicación en la mayor longitud del voladizo de la fachada sur, junto con una mayor inercia térmica del espacio solar del invernadero (debida a la mayor masa de la solera y del voladizo). Otro hecho a destacar es la fuerte inversión térmica, observada en la simulación aquí realizada, entre las temperaturas correspondientes a los dos nodos en los que se

ha dividido la masa de aire del espacio solar del invernadero, que parece poco creíble y podría ser atribuida a una deficiencia en la expresión utilizada por el PASSIM en la modelización del enlace por estratificación.

**Tabla 5.25:** Intercambios caloríficos a través del volumen de control de la casa con invernadero adosado, con apertura de ventanas, en el periodo comprendido entre los días 190 y 200.

Elemento	Intercambio	Q saliente	Q entrante	Q sal. total	Q ent. total	Q total
Muro Trombe inferior	85-77 GM	4.95	13.18	-40.88 (9.05)	+187.96 (33.18)	+147.08
	82-53 GM	6.56	9.44			
	90-30 GM	26.07	29.26			
	90 EM	-	6.24			
	28 EM	-	35.90			
	1 EM	-	28.87			
	14-76 GM	3.30	65.07			
Muro Trombe superior	19-18 GM	7.13	69.23	-26.34 (5.83)	+113.41 (20.02)	+87.07
	79-71 GM	19.21	7.73			
	79 EM	-	3.55			
	94 EM	-	-			
	39 EM	-	16.45			
	6 EM	-	8.22			
	7 EM	-	8.22			
Pared norte	92-97 GM	2.48	0.13	-76.71 (16.98)	+4.26 (0.75)	-72.45
	93-68 GM	4.37	0.19			
	91-89 GM	23.67	3.78			
	60-61 GM	7.47	0.16			
	62-63 GM	11.46	-			
	64-65 GM	27.26	-			
Suelo	28-99 GM	11.44	0.88	-110.74 (24.52)	+32.69 (5.77)	-78.05
	31-99 GM	50.79	12.67			
	32-99 GM	48.51	19.14			
Techo	20-43 GM	66.74	46.05	-108.17 (23.95)	115.78 (20.44)	+7.61
	21-41 GM	41.43	69.73			
Infiltraciones	1-11 GM	4.42	7.87	-50.91 (11.27)	+22.13 (3.91)	-28.78
	2-99 GM	2.38	0.71			
	3-99 GM	2.31	0.15			
	5-99 GM	3.82	0.96			
	6-16 GM	1.41	0.74			
	7-16 GM	1.06	0.54			
	22-16 VM	8.85	6.18			
	23-99 VM	26.66	4.98			
Ganancias internas	3 EM	-	86.4	-	+86.4 (15.25)	+86.4
Total				-413.75	+562.63	+148.88

Todos los flujos en MJ. Los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna. Se ha considerado que la apertura de las ventanas se realiza entre las 6h y las 20h.

En la Tablas 5.27 y 5.28 y en la Fig.5.13 se presentan los resultados de los balances realizados para cada uno de los periodos considerados en la casa con invernadero adosado bajo la hipótesis de apertura de ventanas. Al compararlos con los correspondientes de la casa Trombe (Tablas 5.4 y 5.5) pueden obervarse los hechos destacados anteriormente. Sólo destacar el hecho que ahora la transferencia de calor a través de las paredes es algo mayor, en

detrimiento del desempeñado por las ventanas, debido al mayor sombreamiento experimentado por éstas a causa de la mayor longitud del voladizo.

**Tabla 5.26:** Temperaturas (en °C) de la casa con invernadero adosado, considerando la apertura de ventanas.

Hab. nº	Situación	Días 340-350			Días 190-200		
		Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.
1	sur inf.	15.1	18.8	24.9	25.8	27.5	30.1
2	norte inf.	10.3	11.7	12.4	23.7	25.0	26.8
5	norte sup.	10.6	11.5	12.2	24.7	25.4	27.2
6	sur sup.	13.6	17.1	21.9	25.8	27.4	30.0
11	Trombe inf.	7.79	15.1	33.0	19.3	28.9	43.3
16	Trombe sup.	7.71	14.2	28.2	19.8	26.5	34.6

Se ha considerado que la apertura de las ventanas se realiza para el periodo de invierno entre las 7h y las 17h, y para el periodo de verano entre les 6h y las 20h (hora solar).

**Tabla 5.27:** Balance térmico global de la casa con invernadero bajo la hipótesis de apertura de ventanas para el periodo comprendido entre los días 340 y 350.

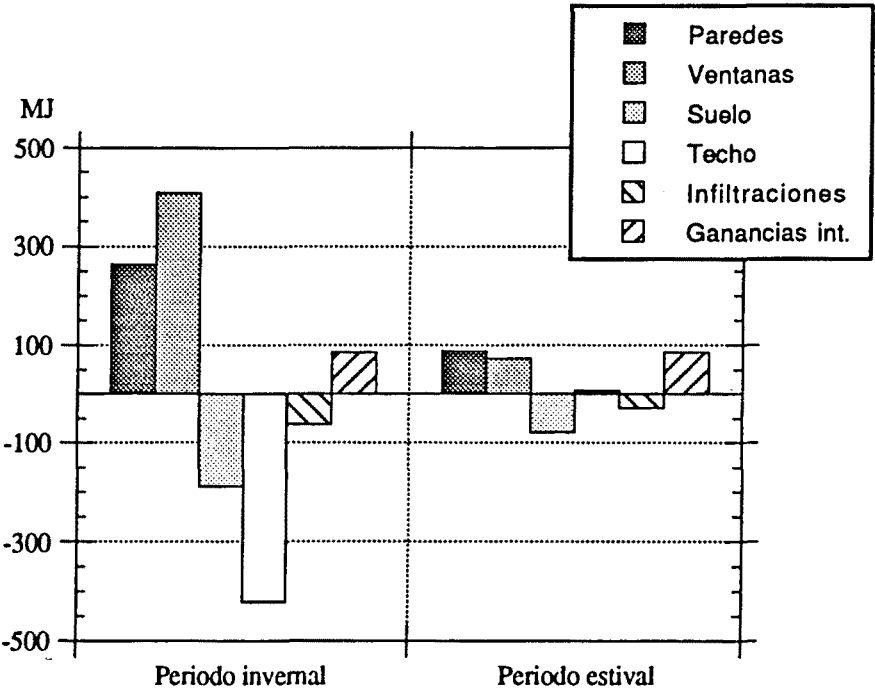
Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-114.53 (11.21)	+377.84 (36.33)	+263.31
Ventanas	-149.99 (14.69)	+558.54 (53.70)	+408.55
Suelo	-191.50 (18.75)	3.31 (0.31)	-188.19
Techo	-420.50 (41.17)	- -	-420.50
Infiltraciones	-76.50 (7.49)	+13.90 (1.34)	-62.60
Ganancias internas	- -	+86.4 (8.30)	+86.4
Energía auxiliar	-	- -	-
Total	--953.02	+1039.99	+86.97

Los flujos vienen expresados en MJ y los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

**Tabla 5.28:** Balance térmico global de la casa con invernadero bajo la hipótesis de apertura de ventanas para el periodo comprendido entre los días 190 y 200.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-68.13 (15.08)	+157.08 (27.73)	+88.95
Ventanas	-75.80 (16.78)	+148.55 (26.22)	+72.75
Suelo	-110.74 (24.52)	-32.69 (5.77)	-78.05
Techo	-108.17 (23.95)	115.78 (20.44)	+7.61
Infiltraciones	-50.91 (11.27)	+22.13 (3.91)	-28.78
Ganancias internas	-	+86.4 (15.25)	+86.4
Energía auxiliar	-	-	-
Total	-413.75	+562.63	+148.88

Los flujos vienen expresados en MJ y los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.



**Fig.5.13:** Representación de los resultados del balance térmico global de la casa con invernadero adosado bajo la hipótesis de apertura de ventanas.

5.2.1.2 Empleo de energía auxiliar.

Al igual que para la casa con muro Trombe nos plantearemos ahora el uso de energía de apoyo para mantener las condiciones de confort térmico de forma permanente. Sin embargo, en este caso, sólo consideraremos un régimen de utilización en cada uno de los periodos considerados (ver Sección 5.1.1.2):

Periodo invernal, días 340-350:

I.a) Mantenimiento de una temperatura mínima de 19 °C en todas las dependencias de la casa.

Periodo estival, días 190-200:

V.c) Mantenimiento de una temperatura máxima de 26 °C en todas las dependencias de la casa.

En la Tabla 5.29 se presentan para ambos casos las temperaturas medias y las máximas y mínimas absolutas, así como un resumen de los balances energéticos correspondientes. Para el periodo invernal e igual que sucedía para la casa con muro Trombe, pueden alcanzarse, aquí, puntas de desconfort térmico correspondientes a los momentos en los que las temperaturas son máximas (aunque en este caso estas puntas son algo menores). El consumo energético total es muy parecido al de la casa Trombe, aunque en este caso, es algo superior (634 MJ frente a 627 MJ), pasando a ser, ahora, la F.A.S. del 54.46%, frente al 60.24% alcanzado antes, lo cual viene corroborado por el hecho de que sean, aquí, menores las temperaturas alcanzadas. En cambio para el periodo estival el consumo de energía auxiliar es inferior al de la casa Trombe (227 MJ frente a 310 MJ), obteniéndose una F.A.E. sólo algo superior (60.8% frente a 59.8%).

Tabla 5.29: Resumen de los resultados obtenidos para las distintas hipótesis de empleo de energía auxiliar en la casa con invernadero.

Caso	Qperd. (MJ)	Qganado (MJ)			Qneto (MJ)	FAS/FAE %	Temperaturas (°C)			
		C.S.	Qint	Qaux			Hab	Máx	Media	Mín.
I.a	-1547.87	862.25	86.4	634.48	+35.26	54.46	1	19.0	22.0	28.0
							2	19.0	19.1	19.1
							5	19.0	19.1	19.1
							6	19.0	19.9	24.0
							11	8.49	15.8	33.6
							16	8.67	15.0	28.9
V.c	-578.75	-351.97	86.4	-226.78	+68.65	60.81	1	25.5	26.0	26.0
							2	23.2	24.4	25.9
							5	24.1	24.9	26.0
							6	25.1	26.0	26.0
							11	19.1	28.7	43.0
							16	19.5	26.2	34.3

Puede concluirse, por tanto, como para la estación invernal, existe un ligero mejor aprovechamiento de la energía solar por parte de la tipología de muro Trombe con relación a la de invernadero adosado, siendo la principal causante de esta diferencia, la mayor longitud que



el voladizo de la fachada sur tiene en esta última tipología. Siendo ésta, también, la causa de un ligero mejor comportamiento térmico en verano por parte de la tipología de invernadero. El cual podría mejorarse en invierno si el techo del invernadero se hiciera, al menos en parte de su longitud, de material transparente. Si esta longitud se mantuviera igual en las dos tipologías, creemos que podría invertirse para la estación invernical, la relación entre los comportamientos energéticos a favor de la tipología con invernadero, gracias a la mayor inercia térmica de su espacio solar. Aunque, evidentemente, ello repercutiría en su comportamiento estival si no se tomara la precaución de utilizar algún tipo de protección solar.

5.2.1.3 Ventilación del invernadero en el periodo estival.

Dentro de las estrategias de utilización que pueden influir en el comportamiento térmico de una casa con invernadero, una de las más importantes a considerar es, evidentemente, el estudio de la renovación del aire del espacio solar del invernadero. Para el caso de referencia, en régimen de fluctuación libre con apertura de ventanas, hemos visto como las temperaturas alcanzadas en ese espacio solar eran muy elevadas (Fig.5.12), pues allí se consideró una razón de ventilación relativamente baja (del orden de 2 renovaciones por hora). Ello repercute de forma directa en el nivel de confort térmico alcanzado no tan sólo en ese espacio sino, evidentemente, en las habitaciones adjuntas, p.e. el comedor-sala de estar, donde se obtenía una temperatura media muy alta de 27.5°C (Tabla 5.26).

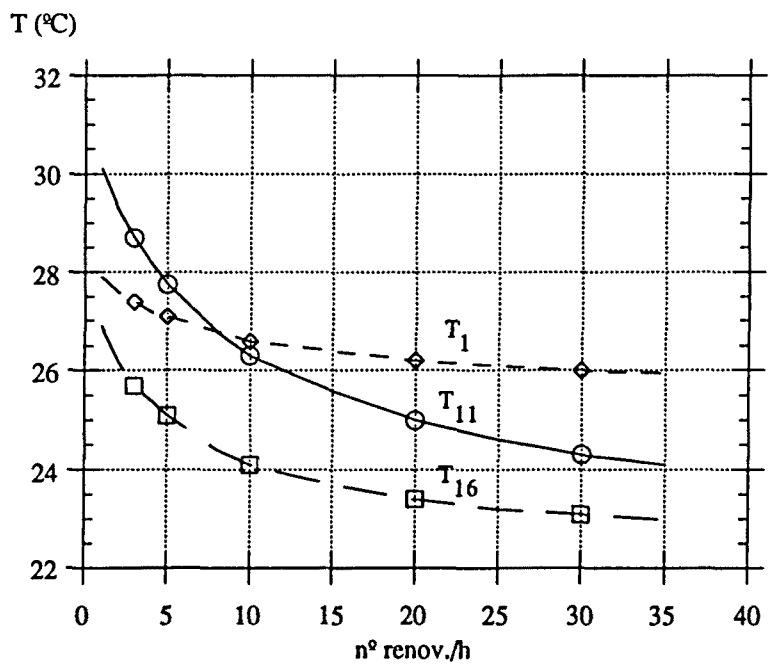


Fig.5.14: Influencia de la renovación del aire del invernadero en las temperaturas medias.

Es por ello, que se ha estudiado la influencia que la renovación del aire del invernadero tiene sobre este aspecto. En la Fig.5.14 se muestra el resultado de este estudio, donde puede verse como al aumentar el número de renovaciones del aire contenido en ese espacio solar, las temperaturas tienden hacia un valor mínimo, que, en este caso, y para la temperatura del comedor es de unos 26°C. Evidentemente, ello se consigue gracias a un consumo de energía para la ventilación forzada de ese espacio. Precisamente, para poder calibrar este aspecto, se ha

Tabla 5.30: Balance térmico global de la casa con invernadero en régimen termostatzado (caso V.c) y 30 NRH, para el periodo comprendido entre los días 190 y 200.

Elemento	Q saliente	Q entrante	Q total
Paredes	-81.69 (16.82)	+130.20 (23.13)	+48.51
Ventanas	-78.47 (16.16)	+140.04 (24.88)	+61.57
Suelo	-94.82 (19.53)	+42.07 (7.47)	-52.75
Techo	-77.49 (15.96)	+145.56 (25.85)	+68.07
Infiltraciones	-63.29 (13.03)	+18.66 (3.31)	-44.63
Ganancias internas	- -	+86.4 (15.35)	+86.4
Energía auxiliar	-89.78 (18.49)	- -	-89.78
Total	-485.54	+562.93	+77.39

Los flujos vienen expresados en MJ y los números entre paréntesis indican el tanto por ciento con relación al total de la columna.

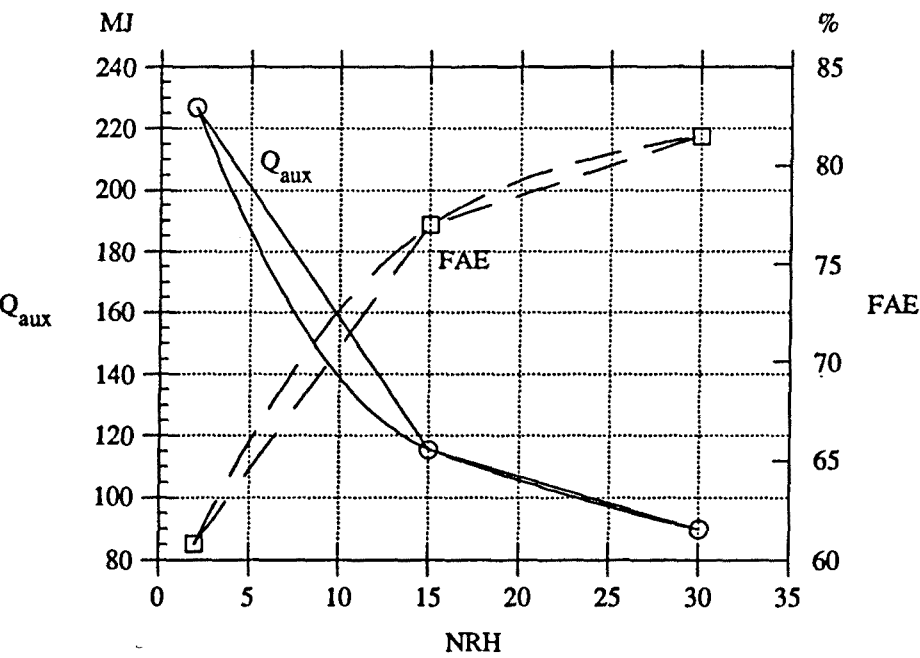


Fig.5.15: Influencia del número de renovaciones del aire del invernadero en el consumo de energía auxiliar y la FAE.

considerado la misma situación pero bajo la hipótesis de empleo de energía auxiliar. En la Tabla 5.30 se muestran los resultados obtenidos para este caso, donde se ha supuesto el mantenimiento de una temperatura de confort de 26°C (hipótesis del caso V.c) con una razón de ventilación grande (30 renovaciones/hora). Puede verse como el consumo de energía auxiliar ha pasado de los 227 MJ anteriores (con 2 renovaciones/hora) a los 90 MJ. En la Fig.5.15 se ha representado la dependencia del consumo de energía auxiliar y de la FAE con el número de renovaciones por hora.

5.2.2 Influencia de distintos parámetros de diseño.

5.2.2.1 Aislamiento en el techo

Al igual que para la casa con muro Trombe se ha analizado aquí la influencia que el aislamiento en el techo tiene en el comportamiento térmico de la casa con invernadero adosado. En concreto se han analizado, al igual que en el apartado anterior, los casos de régimen termostático correspondientes a las hipótesis I.a) y V.c) con 5 cm de poliestireno expandido como aislamiento. En la Tabla 5.31 se presentan los resultados correspondientes a cada una de las situaciones consideradas. Puede verse como la reducción en el consumo de energía auxiliar en el periodo invernal es muy importante, ya que de 634 MJ en el caso sin aislamiento, pasamos a casi la mitad (340 MJ), lo que también queda reflejado en la FAS, que pasa del 54.5% al 65.5%. En cambio, y tal como ya habíamos encontrado para la casa Trombe, la reducción en el consumo de energía auxiliar en el periodo estival es prácticamente despreciable (de 227 MJ hemos pasado a 218 MJ), con un ligero aumento en la FAE (del 61% al 56%).

Tabla 5.31: Resumen de los resultados obtenidos para las distintas hipótesis de empleo de energía auxiliar y aislamiento en el techo para la casa con invernadero.

Caso	Q <sub>perd.</sub> (MJ)	Q <sub>ganado</sub> (MJ)			Q <sub>neto</sub> (MJ)	FAS/FAE %
		C.S.	Q <sub>int</sub>	Q <sub>aux</sub>		
I.a	-1229.44	+1237.63			+8.19	65.54
		811.20	86.4	340.03		
V.c	-499.03	+591.59			+92.56	56.22
		-280.59	86.4	-218.44		